

Phys.
O.
87a



Phys.
o.
87^a-

GRUNDZÜGE
DER
ELECTRICITÄTSLEHRE.

ZEHN VORLESUNGEN

GEHALTEN

VOR DEN MITGLIEDERN DES ÄRZTLICHEN VEREINS
IN MÜNCHEN

VON

Dr. W. VON BEETZ,

ORD. PROFESSOR DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE IN MÜNCHEN
UND ORD. MITGLIED DER K. BAYER. AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN;
EHRENMITGLIED DES ÄRZTLICHEN VEREINS.

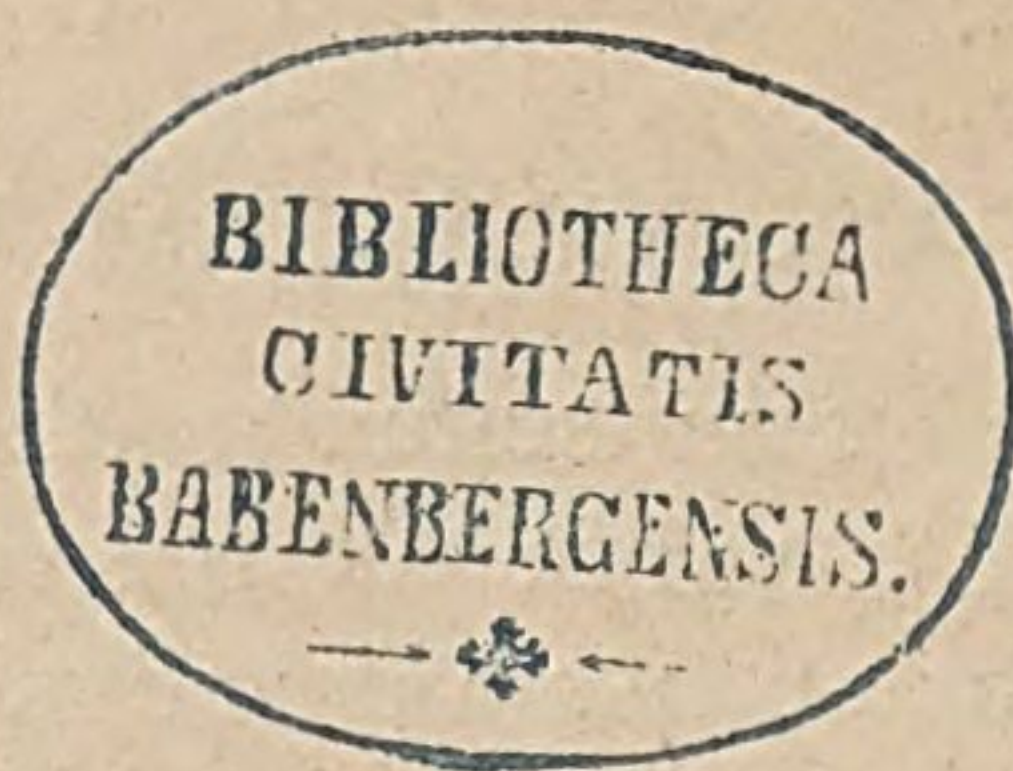
MIT 56 HOLZSCHNITTEN.

STUTTGART.
MEYER & ZELLER'S VERLAG.
(FRIEDRICH VOGEL.)

1878.

*Phys.
87a*

Das Recht der Uebersetzung ist vorbehalten.



Druck von Gebrüder Kröner in Stuttgart.

VORWORT.

Der von verschiedenen Seiten her an mich ergangenen Aufforderung, meine vor den Mitgliedern des ärztlichen Vereins in München gehaltenen Vorträge zu veröffentlichen, komme ich hiermit nach, nicht in der Absicht, Neues oder Besseres zu bringen, als die in den letzten Jahren erschienenen Lehrbücher der Electricitätslehre für Mediciner gebracht haben, sondern zunächst als eine Erinnerung an das Gehörte und Gesehene für meine Herren Zuhörer selbst. Die Aufgabe, welche ich mir gestellt hatte, war durchaus nicht, die Lehre von der Electricität erschöpfend vorzutragen, ebensowenig die, eine Reihe von Vorschriften zu geben, wie man mit electricischen Apparaten umzugehen habe, sondern die, das Wichtigste aus der Electricitätslehre in seinem natürlichen Zusammenhange darzustellen und alles Gegebene durchaus aus den vorgezeigten Experimenten herzuleiten. So habe ich denn auch hier meine Versuche ganz so beschrieben, wie ich sie angestellt habe. Auf die in's Einzelne gehende Beschreibung von Messapparaten habe ich wenig Zeit und Raum verwendet; ich habe dieselben immer durch schematische Apparate ersetzt; in Vorträgen kann man doch nur das Princip, auf dem jene Apparate

beruhen, kennen lernen; die speciellen Einrichtungen lehrt nur der persönliche Umgang mit den Apparaten.

So ist denn ein in engen Rahmen zusammengedrängter Abriss der Electricitätslehre entstanden, der vielleicht auch manchem andern Leser willkommen sein wird, zumal da viele Versuche von der üblichen Form abweichen.

München, im Februar 1878.

Bz.

INHALT.

	Seite
Erster Vortrag. Erregung der Electricität durch Reibung. Electricitätsmenge. Oberflächendichtigkeit. Spannung. Influenz	1
Zweiter Vortrag. Verstärkungs-Apparate. Electrophor. Influenzmaschine. Condensator. Leydener Flasche	11
Dritter Vortrag. Erregung der Electricität durch Contact. Spannungsdifferenz. Volta'sche Säule. Entstehung des Stromes. Ohm'sches Gesetz	22
Vierter Vortrag. Einheiten des Widerstandes und der electromotorischen Kraft. Galvanoskop. Anordnung der Batterieen	33
Fünfter Vortrag. Stromverzweigung. Stromdichte. Messung von Widerständen. Vergleichung electromotorischer Kräfte. Ströme in nicht prismatischen Leitern	41
Sechster Vortrag. Chemische Wirkung des Stromes. Electrolytisches Gesetz. Polarisation. Constante Ketten	52
Siebenter Vortrag. Stromarbeit. Electricitätserregung durch chemischen Process. Wärmeerregung durch den Strom. Electricitätserregung durch Wärme	64
Achter Vortrag. Electrodynamik. Electromagnetismus. Galvanometer . .	76
Neunter Vortrag. Electroinduction. Inductionsapparate	90
Zehnter Vortrag. Magnetinduction. Dynamoelectrische Maschine. Dämpfung	100

ERSTER VORTRAG.

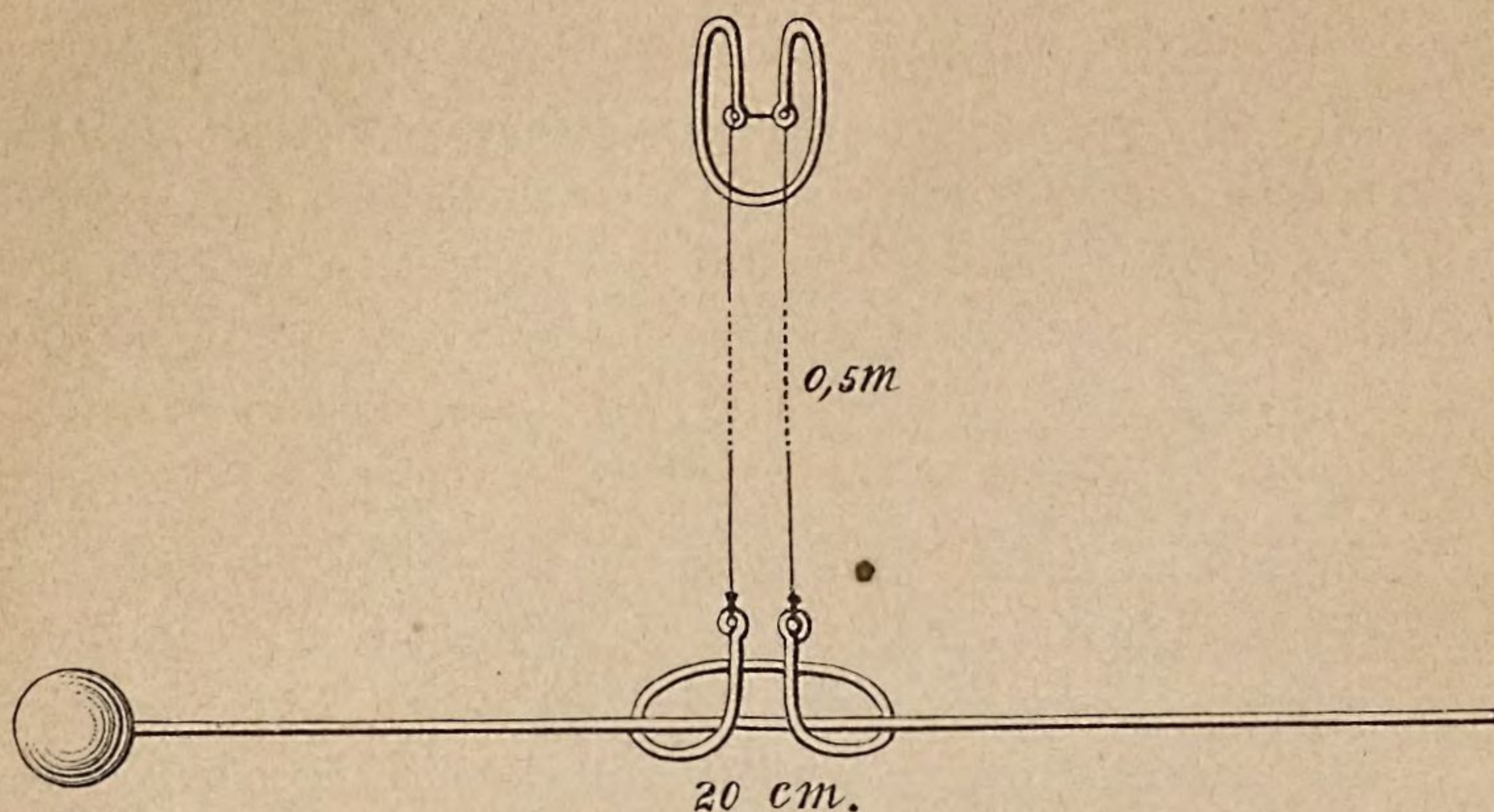
Meine Herren!

Nachdem die Hoffnungen, welche die ältere Medicin auf die Anwendung der Maschinenelectricität als Heilmittel gesetzt hatte als gescheitert angesehen werden durften, hat die Lehre vom electrischen Strom in der neueren Therapie und Physiologie sich eine hervorragende Bedeutung erobert. Wenn ich trotzdem meine Vorträge mit den einfachsten Grundlehren der statischen Electricität anfangen, so thue ich das, weil gerade bei diesen eine Reihe von Vorstellungen und Vorgängen, auf die wir uns später stützen müssen, am leichtesten verständlich gemacht werden kann. Ich werde deshalb von den electrostatischen Grunderscheinungen ausgehend zu den Gesetzen der bewegten Electricität zu gelangen streben, selbst auf die Gefahr hin, Ihnen zunächst nur allgemein Bekanntes zu wiederholen.

An zwei parallelen Seidenfäden habe ich einen leichten Bügel von Aluminiumdraht aufgehängt. In denselben lege ich ein Schellackstäbchen, welches an einem Ende eine Hollundermarkkugel trägt. Reibe ich nun eine Glasstange und eine Ebonitstange (Hartgummi) aneinander, so erhält jede von den beiden die Eigenschaft, die Hollundermarkkugel anzuziehen. Wir nennen sie dann *electrisch*. Wähle ich andere Körper statt der genannten Stangen, so tritt immer dasselbe ein, bald in höherem, bald in geringerem Grade, nur einige Körper, z. B. dieser Messingstab, zeigen durchaus die beschriebene Eigenschaft nicht. Befestige ich aber den Messingstab an einem Ebonitgriff, reibe ihn dann mit einem andern Körper, z. B. mit Haaren (Katzenfell), so erscheint er ebenfalls electrisch, er hatte also die Eigenschaft, electrisch zu werden, ebenfalls angenommen,

sie aber an die Hand abgegeben. Körper, die sich so verhalten, heissen *Leiter* der Electricität, die anderen *Nichtleiter* oder Isolatoren. Die Leiter müssen durch Isolatoren von ihrer Umgebung abgesondert werden, um ihren electrischen Zustand zu bewahren. Vollkommene Isolatoren giebt es nicht, zu den vollkommensten gehören Schellack, Ebonit, Seide und

Fig. 1.



trockene Luft, zu den besten Leitern die Metalle. Auch feuchte Luft leitet nicht viel besser, als trockene, aber aus ihr schlägt sich gern die Feuchtigkeit auf die Apparate nieder, und die isolirenden Theile derselben werden dadurch leitend.

Jetzt nehme ich den Schellackstab aus seinem Bügel und ersetze ihn durch die Ebonitstange, welche ich mit der Glasstange gerieben hatte. Nähere ich mich der Ebonitstange mit dieser Glasstange, so wird sie wieder angezogen, reibe ich aber mit derselben Glasstange eine zweite Ebonitstange, und nähere nun die eine Ebonitstange der anderen, so stoßen sich beide ab. Wir sagen deshalb, Glas und Harz (Ebonit) sind verschiedenartig electrisch geworden; die gleichartig electrischen Körper stoßen einander ab, die ungleichartig electrischen ziehen einander an. Diesen Vorgang denken wir uns so, dass es zwei verschiedene Electricitäten giebt, die Glaselectricität oder die *positive* und die Harzelectricität oder *negative*. Ein Körper heisst *neutral* electrisch oder un-electrisch, wenn er beide Electricitäten in gleichem Maasse enthält; electrisch, wenn er einen Ueberschuss von der einen enthält.

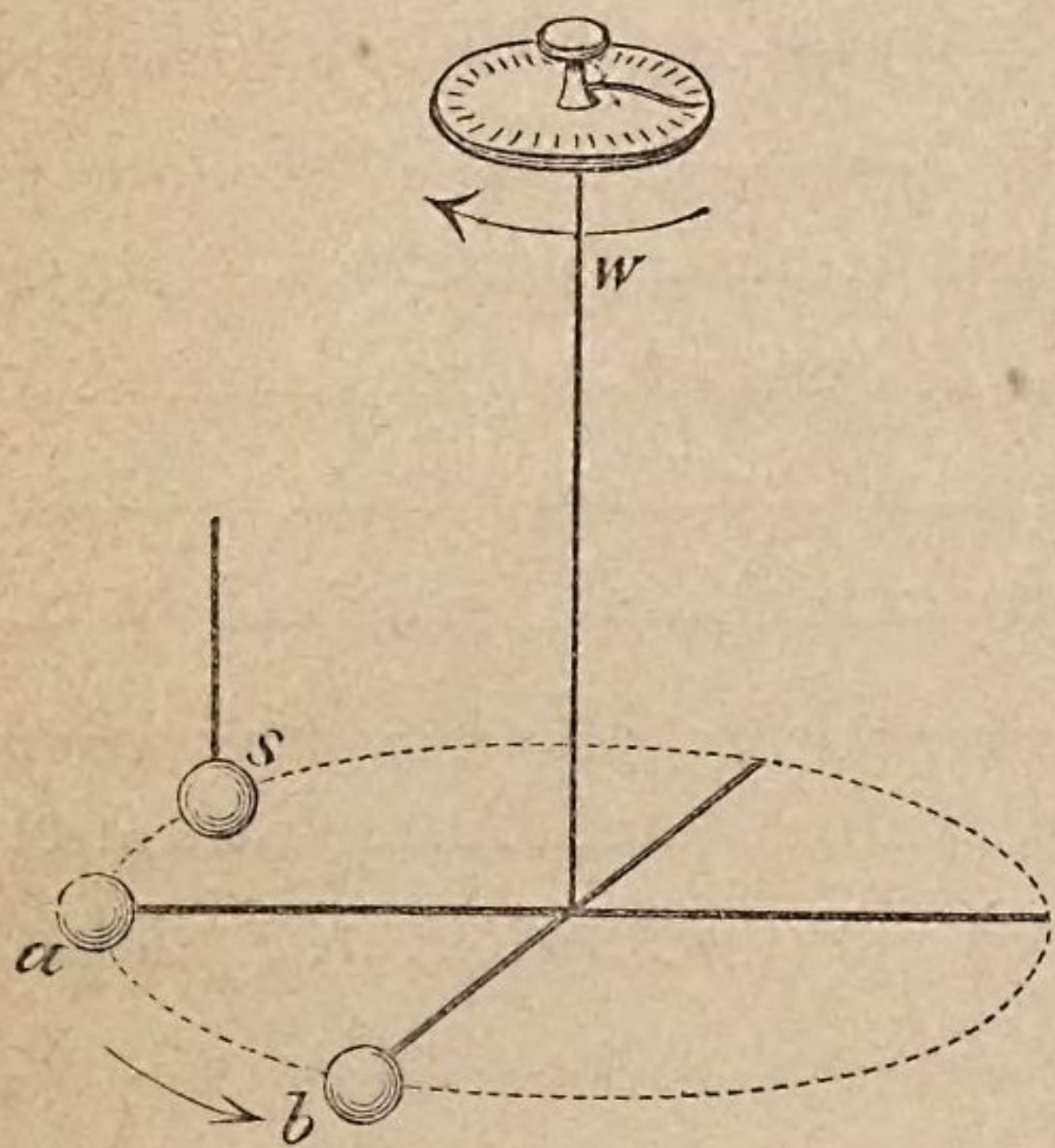
Die Eigenschaft des Electrischseins lässt sich übertragen. Lege ich wieder das Schellackstäbchen mit der Hollundermarkkugel in den Bügel,

und berühre diese mit der geriebenen Ebonitstange, so nimmt sie von dieser selbst Electricität an und zwar negative, und wird folglich von ihr abgestossen; von der geriebenen Glasstange aber, welche positiv ist, wird sie angezogen. So erhalten wir ein äusserst empfindliches *Electroskop*, das Bifilarelectroskop. Sobald wir seiner Kugel negative Electricität mitgetheilt haben, wird dieselbe von einem jeden negativ electrischen Körper abgestossen, von jedem positiv electrischen aber angezogen. So können wir uns denn überzeugen, dass jede zwei Körper, die wir an einander reiben, electrisch werden und zwar immer der eine positiv, der andere negativ. Wir können deshalb alle Körper in eine Reihe ordnen, so dass ein jeder mit einem der folgenden gerieben positiv, mit einem der vorhergehenden gerieben negativ electrisch wird. Je weiter zwei Körper in dieser Reihe auseinander stehen, desto mehr Electricität entwickeln sie, wenn sie an einander gerieben werden. Am positiven Ende dieser Reihe stehen Haare und Glas, am negativen Harze und Metalle, zwischen ihnen Seide; Glas wird also durch Reibung mit Katzenfell negativ, durch Reibung mit Seide positiv, Harz (Ebonit) durch Reibung mit Seide negativ, durch Reibung mit Metallen positiv; besonders starke Electricität aber erzeugen wir durch Reibung zwischen Katzenfell und Ebonit oder zwischen Glas und Metallen (mit einem Amalgam eingeiebenem Leder). Zur Herstellung einer *Electrisirmaschine* bedienen wir uns deshalb am zweckmässigsten einer dieser Combinationen. Glas-scheiben und Glasstäbe beschlagen gern in feuchter Luft, deshalb wird in unserer Maschine eine drehbare Ebonitscheibe zwischen Katzenfellen gerieben. Die in ihr erregte Electricität wird durch metallene Sammler aufgenommen und in eine grosse Metallkugel, den Conductor, geführt welcher durch eine Ebonitstange getragen wird. Ebenso kann die in den Reibzeugen entwickelte negative Electricität zu einem isolirten Conductor geführt werden; in der Regel aber verbinden wir die Reibzeuge ableitend mit dem Erdboden, um das Ansammeln ihrer positiven Electricität zu verhindern, weil sie leicht einen Theil der entwickelten negativen Electricität aufheben könnte. Nur wenn wir die positive gerade benutzen wollen, sammeln wir sie, leiten dann aber dafür die negative aus dem Scheibenconductor ab.

Durch die Möglichkeit, Electricität auf andere Körper zu übertragen, kommen wir sofort auf den Begriff der *Electricitätsmenge*. Ist eine an seidener Schnur hängende Metallkugel positiv electrisch und ich berühre sie mit einer zweiten ganz gleichen Kugel, so vertheilt sich die

Electricität zwischen beiden; ich brauche für diesen Zweck gar nicht zu wissen, wo sich die Electricität in der ersten Kugel befand, ob im Innern derselben oder auf der Oberfläche; jedenfalls wird sie sich in der zweiten Kugel ganz ebenso anordnen, wie in der ersten und darum kann ich eine Electricitätsmenge halbiren. Ist die zweite, berührende Kugel verhältnissmässig klein gegen den berührten electrischen Körper, so wird dieser durch die Berührung wenig von seiner Electricität einbüßen, die kleine Kugel wird aber immer einen gewissen Bruchtheil von derselben aufnehmen. Nähere ich nun die auf diese Weise electrisch gemachte Kugel, welche an einem isolirenden Stäbchen festgehalten wird (die Standkugel s), einer unelectrischen Kugel a , so wird diese zuerst angezogen, dadurch selbst gleichartig electrisch gemacht und also abgestossen. Ich habe die zweite Kugel wieder am Ende eines Schellackstäbchens befestigt, welches diesmal in seinem Schwerpunkte an einem dünnen Silberfaden aufgehängt ist. Hierdurch erhalte ich die Möglichkeit, die Kraft zu messen, mit welcher die beiden Kugeln einander abstossen.

Fig. 2.



Ist das Schellackstäbchen durch die Abstossung um den Bogen ab abgelenkt, so drehe ich den Knopf, an welchem der Silberfaden befestigt ist, in dem der Drehung ab entgegengesetzten Sinne solange, bis die Kugel von b wieder nach a zurückgekehrt ist. Der Winkel w , um welchen ich das obere Drahtende gedreht habe, ist jetzt das Maass für die abstossende Kraft der Electricität, denn diese ist durch die Torsion des Drahtes gerade aufgehoben worden. Da ich nun die Kraft, welche eine

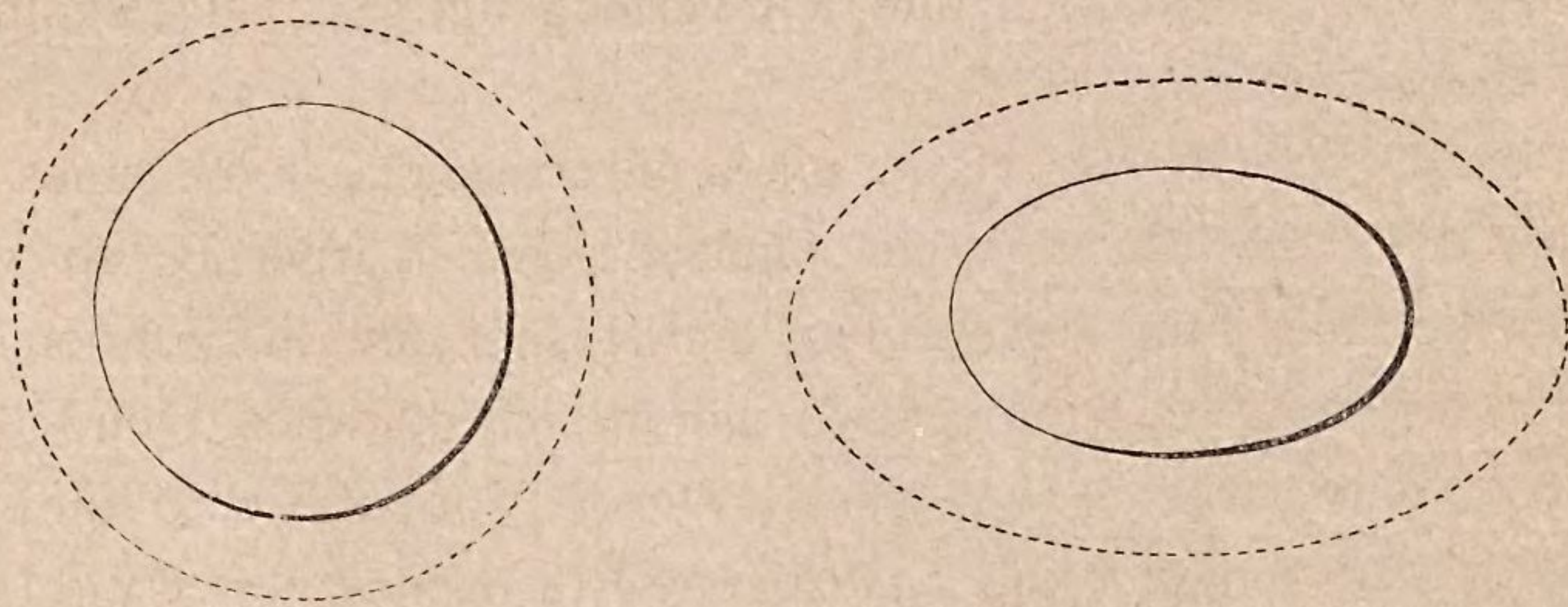
Drillung des Drahtes um einen gewissen Winkel hervorzubringen vermag, in Gewichtseinheiten ermitteln kann, so giebt die *Torsionswaage* die Mittel an die Hand, um die Kraft, mit der die beiden Kugeln einander abstossen, in absolutem Maasse auszudrücken und die Gesetze zu finden, nach denen electrisirte Massen auf einander wirken. Indem man die Standkugel mit verschiedenen Electricitätsmengen versieht und ein anderes Mal die Entfernungen, bis zu welchen die Standkugel und die bewegliche Kugel einander genähert werden, wechseln lässt, findet man, dass die electrische Abstossung ganz denselben Gesetzen folgt, wie die Anziehung durch die Gravitation, d. h. dass die abstossenden Kräfte sich

gerade wie die abstossenden Electricitätsmengen und umgekehrt wie die Quadrate ihrer Abstände von einander verhalten.

Was nun die Anordnung der Electricität auf einem Leiter betrifft, so können wir zunächst annehmen, das ganze Innere desselben sei mit Electricität gefüllt. Dann werden aber je zwei Theilchen derselben sich abstossen und ein jedes wird solange der Resultirenden aus Allen auf dasselbe wirkenden Kräften folgen, bis es an der Grenze eines Nichtleiters, d. h. an der Oberfläche des Körpers angekommen ist. Im Gleichgewichtszustande befindet sich also alle Electricität an der Oberfläche der Leiter. Electrifice ich daher eine an einer seidenen Schnur aufgehängte Messingkugel, bedecke dieselbe mit zwei hohlen an gut isolirenden Griffen gehaltenen Halbkugeln, nehme diese rasch ab und prüfe sie am Bifilarelectroskop, so sind sie stark electrisch, während sich die Kugel als unelectrisch erweist. Setze ich auf eine isolirte Metallplatte eine Metallsäule, an welcher an dünnem Aluminiumdraht eine Hollundermarkkugel hängt, so wird diese abgestossen, sobald ich das ganze metallisch unter sich verbundene System von der Electrisirmaschine her electrifice. Bedecke ich aber die Platte und das auf ihm stehende Electroskop mit einer aus Drahtnetz gefertigten Glocke, so hängt die Hollundermarkkugel ruhig herab, im Innern der Glocke ist keine Electricität bemerkbar, sie befindet sich nur auf der Oberfläche der Leiter.

Auf der Oberfläche einer Kugel wird die Electricität sich ganz gleichförmig vertheilen. Nennen wir die auf einem Quadratmillimeter

Fig. 3.

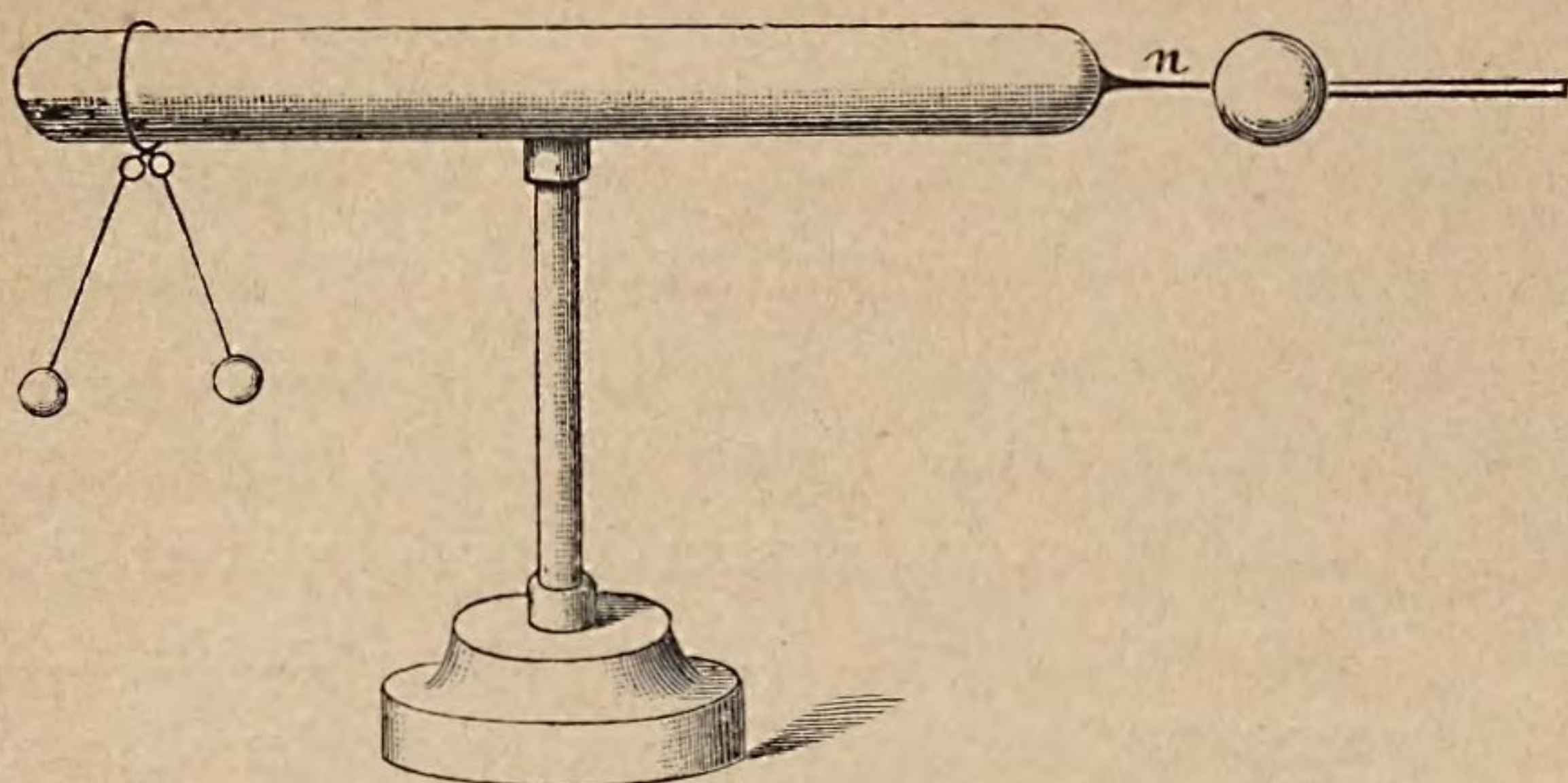


Oberfläche vorhandene Electricitätsmenge die electrische *Dichtigkeit* (Oberflächendichtigkeit), so können wir sagen: auf einer Kugeloberfläche ist überall die gleiche Dichtigkeit vorhanden; hat aber der Leiter eine andere Gestalt, z. B. die eines Ellipsoïds, so ist die Dichtigkeit an den Stellen grösster Krümmung am grössten. Wir versinnlichen durch

punktirte Linien die gleichmässige Dichtigkeit auf der Kugel- und die ungleichförmige auf der Ellipsoidfläche. Der Abstand dieser Linien vom Contour des Körpers giebt uns die an jeder Stelle vorhandene Dichtigkeit an.

Je weiter ein Körpertheil aus der Kugelgestalt hervorragt, desto grösser wird auf ihm die Dichtigkeit. Auf Spitzen wird dieselbe unendlich und die Electricität strömt deshalb frei aus.

Fig. 4.



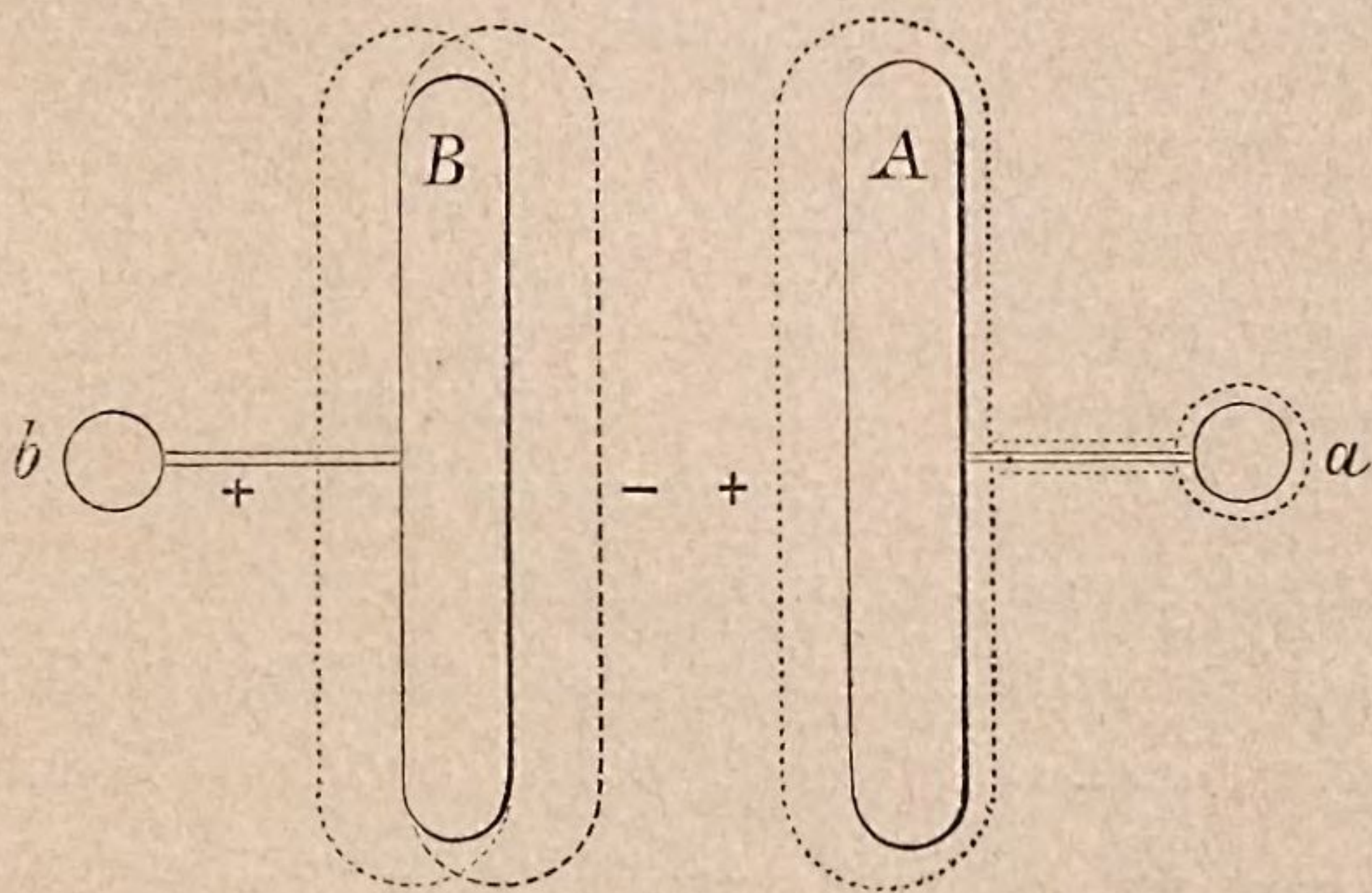
Ich hänge an einem isolirten mit abgerundeten Enden versehenen Messingstabe zwei Hollundermarkkugeln an Aluminiumdrähten nebeneinander auf. Der Stab trägt an seinem einen Ende eine spitze Nadel *n*, auf welche ich eine, an isolirendem Griffe befestigte Hollundermarkkugel gesteckt habe. Ich kann den Stab durch Berühren mit einer geriebenen Ebonitstange leicht so electrifiziren, dass die Electroskopkugeln weit divergiren. Sowie ich aber die Kugel von der Nadel fortziehe, fallen die Electroskopkugeln zusammen und ich vermag den Stab überhaupt nicht mehr zu electrifiziren.

Befindet sich in der Nähe eines electrischen, z. B. eines positiv electrischen Körpers *A* isolirt ein unelectrischer Körper *B*, so wird in letzterem eine Scheidung der beiden, sich bisher neutralisirenden Electricitäten hervorgebracht. Die negative nähert sich dem positiven Körper *A*, die positive entfernt sich von ihm. Dieser Vorgang wird die *Influenz* oder Vertheilung genannt, die angezogene Electricität heisst die Influenz-electricität erster Art (hier die negative), die abgestossene die Influenz-electricität zweiter Art (hier die positive), zugleich wird die Anordnung der positiven Electricität auf dem influencirenden Körper *A* so geändert, dass ihre Dichtigkeit nach der Seite des Körpers *B* hin grösser wird. Verbinde ich den Körper *B* leitend mit dem Erdboden, so wird die

+ El: abgeleitet, die — El: aber wird von der + El: in A festgehalten oder *gebunden*; ebenso ist die + El: in A durch die — El: in B gebunden, d. h. ich kann die + El: in A durch Berührung mit dem Finger nicht fortschaffen. Die Bindung ist aber keine vollkommene; sie würde es sein, wenn A und B einander unendlich nahe gebracht werden könnten. Je weiter sie von einander entfernt sind, desto geringer ist die Menge der sich bindenden Electricitäten, ein um so grösserer Ueberschuss bleibt in A ungebunden zurück. Fahre ich fort, die beiden Körper A und B einander zu nähern, so wächst die Dichtigkeit der sich gegenüberstehenden Electricitäten so sehr, dass sie in Gestalt eines *Funkens* den trennenden Isolator (die Luft) durchbrechen.

Ich will das eben Gesagte Ihnen experimentell vorführen, dazu aber mich eines Apparates bedienen, der es mir erleichtern soll, noch einen neuen Begriff zu definiren und von den bisher besprochenen sorgfältig zu scheiden, den ich bisher absichtlich vermieden habe.

Fig. 5.



Die beiden Körper A und B haben die Form kreisförmiger, einander parallel gegenübergestellter Platten mit abgerundeten Rändern; sie sind durch dünne Drähte mit den kleinen Metallkugeln a und b verbunden. An diese kleinen Kugeln kann ich Electroskope anhängen. Electrisire ich A positiv, so divergiren die Electroskope von a und von b, und zwar beide mit positiver Electricität. Rücke ich B nahe an A heran, so nimmt die Divergenz bei a ab, die bei b zu. Berühre ich B leitend, so fallen beide Electroskope herab, wir nehmen keine freie Electricität mehr wahr; entferne ich aber B von A, so divergiren beide Electroskope, aber jetzt a mit positiver, b mit negativer Electricität.

Ich habe also B durch die Influenz der positiven Electricität in A negativ geladen.

Wir wollen bei dieser letzten Thatsache etwas verweilen, bei der Möglichkeit, einen Körper mit irgend einer Electricität zu laden, ohne ihn mit einem gleichnamig electrischen Körper (durch Mittheilung) zu berühren. Nehmen wir ein Electroskop, wie wir es vorher benutzt haben, d. h. zwei an leitenden Fäden nebeneinander herabhängende Hollundermarkkugeln, die wir besser durch zwei noch leichtere Körper, zwei Gold- oder Aluminiumblätter ersetzen und die wir, um den Einfluss der Luftbewegung zu vermeiden, in eine Glaskugel einschliessen. Man electrisirt ein solches Electroskop, indem man den Knopf, an dem die beiden Pendel hängen, mit einem electrischen Körper, z. B. einem negativen berührt und erwartet nun, dass sie negativ geladen sein werden. Sie sind aber positiv geladen (wenigstens in den meisten Fällen) und lassen sich durch Berührung des Knopfes nicht entladen. Beim zu grossen Annähern des negativen Körpers ist nämlich $+$ El: in die Pendel gezogen, $-$ El: aber aus ihren Enden auf die innere Oberfläche der Glaskugel geschoben worden, von wo her sie die positiven Pendel in ihrer Lage fest hält. Man muss also das Electroskop nicht durch Mittheilung, sondern durch Influenz laden: Man nähert dem Knopfe den negativen Körper, berührt den Knopf leitend mit der Hand, entfernt die Hand, dann den negativen Körper und hat nun das Electroskop positiv geladen. Wird die Glaskugel durch einen metallenen, mit Glasfenstern versehenen Mantel ersetzt, so kann ein solches Festsetzen einer Electricität auf der Gefässoberfläche nicht mehr stattfinden; diese Abänderung des Electroskops bietet aber noch einen anderen Vortheil. Setze ich dasselbe auf eine Ebonitplatte, nähere ihm den negativ electrischen Körper, berühre aber dabei nicht den Knopf, sondern den Metallmantel, so wird dieser negativ geladen. Die Pendel im Innern bleiben dabei ruhig hängen. Berühre ich aber nun den Knopf, so lade ich das Electroskop durch Influenz vom Mantel her, und zwar negativ, ich kann also das Mantelelectroskop durch einen negativ electrisirten Körper nach Belieben positiv oder negativ laden, und zwar beidemal durch Influenz.

Sie begreifen jetzt auch, warum ein electrischer Körper einen un-electrischen anzieht, er scheidet in ihm zuerst die beiden Electricitäten, und da hierbei die entgegengesetzte näher herantritt, so zieht er diese stärker an, als er die entferntere, gleichartige abstösst.

Endlich ist jetzt die durch die Blitzableiter allgemein bekannte

Thatsache, dass Spitzen Electricität einsaugen, verständlich geworden. Nähere ich einem unelectrischen mit einer Spitze versehenen Körper einen positiv electrischen, so strömt seine — El: zu diesem über, die + El: aber bleibt in ihm zurück.

Und nun wenden wir uns wieder zu unserem aus den beiden Platten A und B und den beiden zugehörigen Kugeln a und b bestehenden Influenzapparat. Ist zuerst nur das eine System A a vorhanden und electrisch gemacht, so ist die Dichtigkeit auf demselben sehr verschieden vertheilt, in der kleinen Kugel ist sie weit grösser, als auf der grossen Platte. Eine andere Grösse aber ist auf dem ganzen System die gleiche, das ist die *Spannung* oder das *Potential* (richtiger die Potentialfunction) der Electricität. Die Spannung ist diejenige Grösse, deren Abnahme nach irgend einer Richtung hin die in dieser Richtung wirkende Triebkraft der Electricität misst; sie ist nicht etwa selbst eine Kraft. Ich will versuchen, Ihnen diesen Unterschied zwischen Potential und electrischer Triebkraft an einem Beispiel zu vergegenwärtigen. Wenn ein schwerer Körper von einer gewissen Höhe auf die Erdoberfläche fällt, so langt er dort mit einer gewissen Wucht (lebendigen Kraft oder kinetischen Energie) an. Die wirkende Kraft ist die Gravitation, welche wir vom Endmittelpunkte aus wirkend denken können. Nehmen wir ganz ebenso den Mittelpunkt als den Ausgang der Anziehung einer electrischen Kugel auf einen in unendlicher Ferne befindlichen, nicht schweren Körper, welcher die Einheitsmenge der Electricität enthält, an, so wird auch dieser Körper mit einer gewissen Wucht gegen die Kugel fallen und diese Wucht ist das Potential der Kugel in Bezug auf einen Punkt ihrer Oberfläche. Solange das Potential oder die Spannung in einem Körper nicht durchweg dieselbe ist, ist noch kein electrischer Gleichgewichtszustand eingetreten. Da in unserem System A a Gleichgewicht herrscht, so ist auf demselben überall die gleiche Spannung vorhanden. Berühre ich die Kugel a mit einer andern kleinen isolirten Kugel, z. B. mit der Standkugel aus der Torsionswage, so nehme ich wieder einen kleinen Theil der vorhandenen Electricität fort, die ich zu Messungen benutzen kann; die Spannung in ihr wird dadurch unmerklich verändert. Lade ich A stärker, so nimmt auch in a die Dichtigkeit zu, und zwar in gleichem Maasse, ebenso der von der Standkugel übernommene Antheil. Die Spannung ist also derjenige electrische Zustand eines Körpers, den ich von einer kleinen, mit ihm verbundenen Kugel aus electrometrisch messen kann.

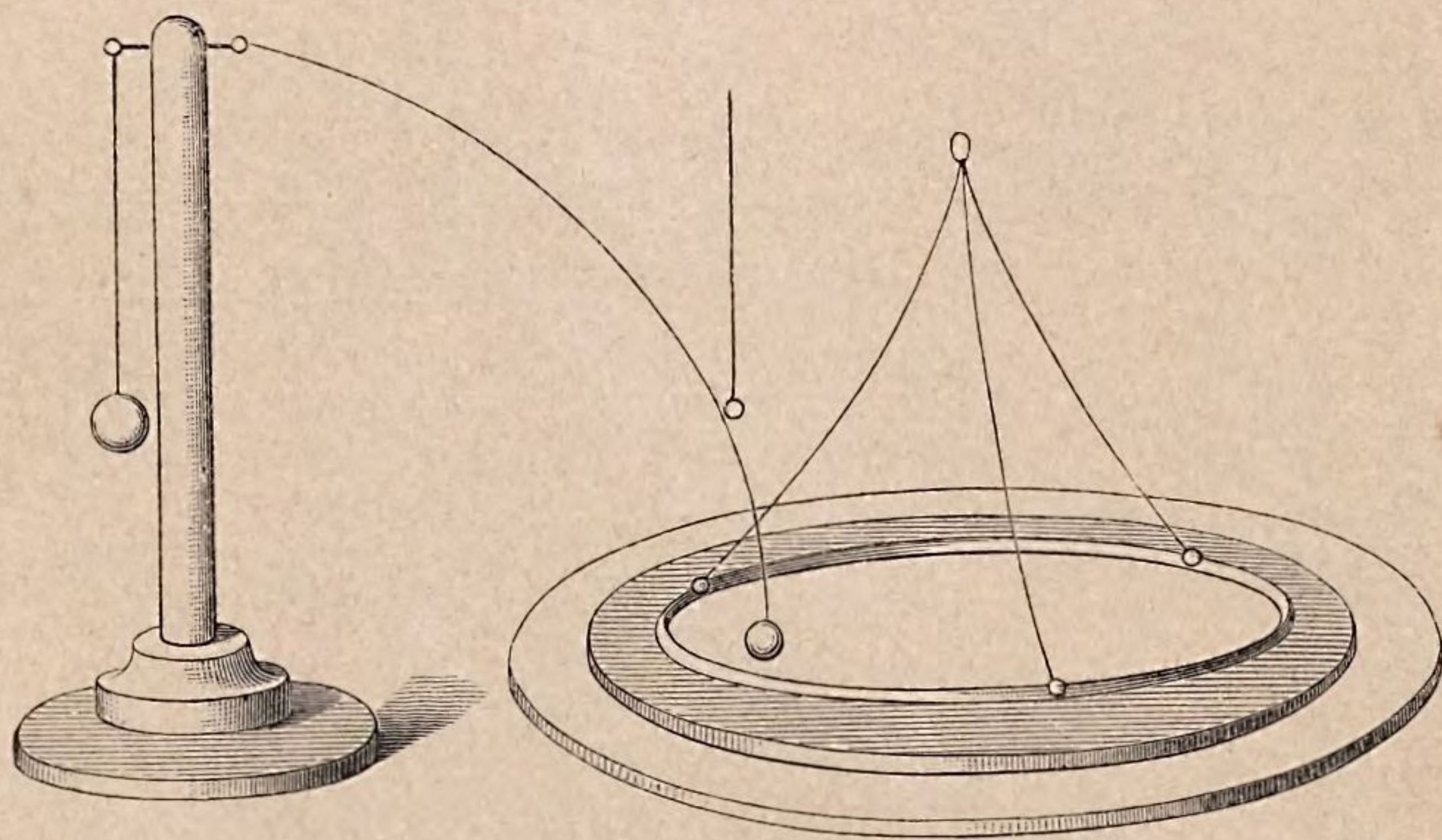
Nun nähere ich wieder die Platte B der Platte A und berühre b leitend. Jetzt wird die — El: in B von der + El: in A festgehalten, die + El: aus B abgeleitet. Die Electricität in B ist jetzt ganz ohne Spannung, aber nicht ohne Dichtigkeit; durch die gestrichelte Linie habe ich diese wieder angedeutet. Auf A ist die Dichtigkeit der + El: zwar auch ähnlich vertheilt, wie die der — El: auf B, aber diese + El: ist nicht ohne Spannung; ich kann von a eine kleine Electricitätsmenge entnehmen und messen. Freilich ist die Dichtigkeit in a jetzt viel kleiner, als vorher. Hatte ich zuerst A so stark geladen, dass bei weiterer Ladung die Electricität aus a ausgeströmt wäre, so kann ich jetzt, nachdem die — El: in B den grössten Theil der + El: in A gebunden hat, wieder so lange + El: in A hineinladen, bis die Dichtigkeit in der Kugel a wieder die frühere geworden ist. Ein nach dem Principe der beiden Systeme A und B angeordneter Apparat ist deshalb ein *Ladungs-* oder *Verstärkungsapparat*.

ZWEITER VORTRAG.

Meine Herren!

Die *Verstärkungsapparate* dienen zum Theil selbst zur Erregung, zum Theil nur zur Ansammlung von aussen zugeführter Electricität. Zur ersten Klasse gehört der *Electrophor*. Er besteht aus einer Ebonitplatte, welche auf einer metallenen Bodenplatte liegt und mit einem Blechdeckel bedeckt ist, den ich an seidenen Schnüren aufheben kann.

Fig. 6.

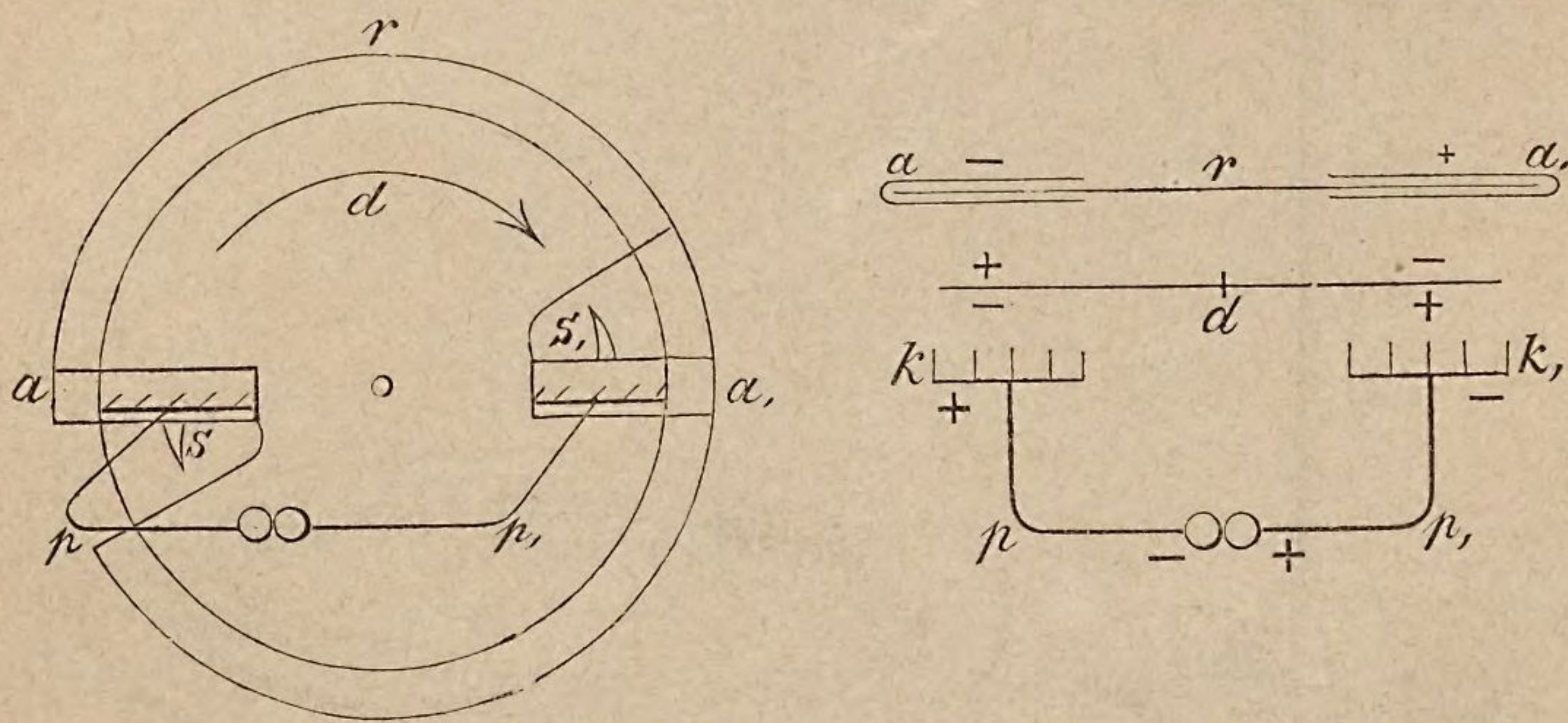


Ich stelle isolirt auf den Tisch das grobe Electroskop, bestehend aus einer Metallsäule, an der ein Aluminiumdraht mit Hollundermarkkugel herabhängt. Durch einen langen Draht verbinde ich mit der Säule eine kleine Messingkugel, welche ich an einer seidenen Schnur aufheben kann. Ich reibe die auf der Bodenplatte liegende Ebonitplatte mit einem Katzenfell und lege die Kugel darauf. Das Electroskop bleibt

in Ruhe, denn die $-$ El: der Platte ist durch die $+$ El: der Bodenplatte zum grössten Theile gebunden. Ich hebe die Ebonitplatte auf, und das Electroskop zeigt, dass sie negativ electrisch ist. Ich lege die Ebonitplatte nieder und bedecke sie mit dem isolirt gehaltenen Deckel, den ich ebenso isolirt aufhebe. Berühre ich ihn mit der Kugel, so zeigt das Electroskop keine Electricität an. Der Deckel hatte also ebenso wenig, wie vorher die Kugel, Electricität aus der Ebonitplatte entnommen. Ich lasse die Kugel auf dem Deckel liegen, lege diesen wieder nieder und berühre ihn leitend. Jetzt habe ich ihm die nicht gebundene $-$ El: fortgenommen, er enthält $+$ El: von grosser Dichtigkeit, aber ohne Spannung. Hebe ich den Deckel auf, so zeigt das Electroskop starke $+$ El: an. Durch Wiederholung dieser Operation kann ich durch die einmal in der Ebonitplatte vorhandene $-$ El: grosse Mengen von Electricitäten scheiden und immer neue $+$ El: aus dem Deckel entnehmen. Dabei wird nicht etwa Electricität aus nichts erzeugt, sondern es muss jedesmal mechanische Arbeit aufgewandt werden, um neue Electricitätsmengen zu scheiden.

In viel bequemerer und ergiebigerer Weise kann solche Arbeit durch die *Influenzmaschine* geleistet werden.

Fig. 7.



Die Holtz'sche Maschine, welche ich hier aufgestellt habe, besteht aus einer firnisirten, feststehenden Glasscheibe r , aus welcher an zwei einander diametral gegenüberstehenden Stellen Stücke herausgeschnitten sind. An den Rändern dieser Ausschnitte ist sie mit den Papierbelegen (Armaturen) a und a' bedeckt, von denen die Papier- oder Stanniolspitzen s und s' in die freien Räume der Ausschnitte hineinragen. Vor dieser Scheibe kann eine zweite ebenfalls firnisirte Glasscheibe d um eine

horizontale Axe gedreht werden. Die Drehung von d erfolgt in der Richtung gegen die Spitzen s und s_1 . Der der Scheibe r abgewandten Fläche von d gegenüber stehen zwei Messingkämme, k und k_1 , durch die Drähte p und p_1 mit Messingkugeln verbunden, welche sich zunächst berühren mögen. Theile ich dem Beleg a — El: mit, die ich durch Reiben einer Ebonitplatte mit Katzenfell erregt habe, so findet sowohl auf der Scheibe d als auch besonders im Kamm k eine Vertheilung statt. In die Kammspitzen tritt $+$ El: und aus diesen auf die Oberfläche von d , während — El: nach den Kugeln hin, durch diese nach k_1 und auf die andere Hälfte der Scheibe gedrängt wird. Während der Rotation erscheint deshalb die obere Hälfte von d positiv, die untere negativ electricisirt. Die mit der oberen Hälfte zwischen k und a angekommene $+$ El: zieht aber aus der Spitze s_1 die — El: an, neutralisirt sich mit derselben und ladet dadurch den Beleg a positiv, so dass nun von a aus durch den Kamm k_1 und die Kugeln das umgekehrte Spiel beginnt, wie vorher von a aus durch den Kamm k . Auf diese Weise steigert sich bis zu einer gewissen Grenze die Ladung beider Belege fortwährend: es wird Arbeit in Electricität umgesetzt. Ziehe ich die beiden Kugeln auseinander, so geht zwischen ihnen ein lebhafter Funkenstrom über und leite ich eine der beiden Kugeln ab, so kann ich aus der anderen Funken ziehen wie aus dem Conductor einer gewöhnlichen Electricitätsmaschine.

Verbinde ich die beiden Kämme einer zweiten Influenzmaschine, von welcher nur die zum Drehen nothwendigen Vorrichtungen entfernt sind, mit den Kämmen unserer ersten Maschine und setze diese in Thätigkeit, so strömen die beiden Electricitäten aus der ersten Maschine durch die Kämme in die zweite über und versetzen deren drehbare Scheibe in schnelle Rotation. In der zweiten Maschine geschieht gerade das Umgekehrte, wie in der ersten; während in dieser Arbeit in Electricität verwandelt wird, entsteht in der zweiten Arbeit aus Electricität.

Die Influenzmaschine ist sehr gut geeignet, um die absoluten Unterschiede der beiden Electricitäten kennen zu lernen. Bei Verdunkelung des Saales unterscheiden Sie deutlich die Funken, welche ich aus dem positiven und negativen Conductor ziehe: die ersteren haben die Gestalt sich garbenartig ausbreitender Lichtbüschel, die letzteren die kleiner, scharf begränzter Knöpfe. Dieselben Unterschiede des Glimmlichtes sehen Sie an den Spitzen der beiden Kämme, aus denen die entgegengesetzten Electricitäten auf die Scheibenfläche überströmen.

Lassen wir aus jedem der Conductoren einen kleinen Funken auf eine Harzplatte überspringen und bestreuen wir die Funkenspuren mit einem Pulver, so projeciren sich die Funkenbilder auf die Harzflächen, das positive als eine sternförmig verzweigte, das negative als eine rund abgegrenzte Figur, die *Lichtenberg'schen* Figuren. Bestand das Pulver aus einem Gemisch von Mennige und Schwefel, so zeigt sich die positive Figur gelb gefärbt, die negative roth, weil die sich aneinander reibenden Bestandtheile des Pulvers selbst electrisch geworden waren, der Schwefel negativ, die Mennige positiv.

Der Funkenstrom, welcher zwischen den beiden Kugeln der Maschine übergeht, zeigt ebenfalls die deutlichen Unterschiede der beiden Electricitäten, welche sich in ihm ausgleichen. Würde ich die Kugeln zu weit auseinanderziehen, so vermag der Strom nicht mehr überzugehen, ja die Maschine erlischt sogar, wenn ich den sich in den Kugeln anstauenden Electricitäten keinen anderweiten Abfluss verschaffe, weil dieselben durch die Kämme auf die Scheibenoberfläche zurückfliessen und dabei die entgegengesetzten Electricitäten neutralisiren. Verdünnte Luft bietet dem Durchgange der Electricität ein geringeres Hinderniss, als solche von gewöhnlichem Druck. Ich leite den Strom der Electricitäten hier durch Geissler'sche Spectralröhren, Glasröhren, welche mit sehr verdünnten Gasen gefüllt sind und hier durch ein electrisches Ei, d. h. ein ellipsoïdisches Glasgefäss, in welches die Electricität durch zwei eingeschmelzte Drähte treten kann und welches ebenfalls ein sehr verdünntes Gas enthält. An allen erkennen Sie die eigenthümliche Farbe, welche einem jeden der leuchtenden Gase, Chlor, Wasserstoff, Stickstoff, Kohlensäure, zukommt, ausserdem aber den blauen Lichtschein, welcher das negative Drahtende charakteristisch umgiebt. Wäre eine der Röhren völlig leer, so würde gar keine Electricität durch dieselbe gehen, denn wir haben den luftleeren Raum nicht etwa als einen Leiter der Electricität zu betrachten; der Träger der Leitung muss wirklich ein materieller Körper sein; die dichteren Gase setzen nur der Fortpflanzung der Electricität ein grösseres Hinderniss entgegen, als verdünnte.

Um weitere Versuche mit der Influenzmaschine anstellen zu können, muss ich zuerst von den übrigen Verstärkungsapparaten sprechen.

Der *Condensator* kann ganz so geformt sein, wie der Apparat, an dem ich den Vorgang der Influenz demonstirte. Er kann auch aus zwei horizontalen Platten bestehen, welche aufeinander liegen, durch eine dünne Luft- oder Lackschicht von einander getrennt. Die untere, die

Collectorplatte, ist isolirt aufgestellt und trägt ein Electroskop. Ich lade sie fortgesetzt mit — El:, während ich die obere, die Condensatorplatte, leitend berühre. Die Pendel hängen noch ruhig, weil sich die beiden Electricitäten binden. Hebe ich die obere Platte ab, so divergiren die Pendel mit — El:. Wir benutzen diesen, gewöhnlich sehr im Kleinen ausgeführten Apparat, um kleine Electricitätsmengen zu sammeln; ich finde es für die Demonstration sehr zweckmässig, die eine der Platten dabei ganz wegzulassen. Ich setze die bewegliche Platte auf einen polirten Tisch und lade sie. Das Holz leitet hinreichend, um die Influenz herzustellen und so den Dienst der Condensatorplatte zu versehen.

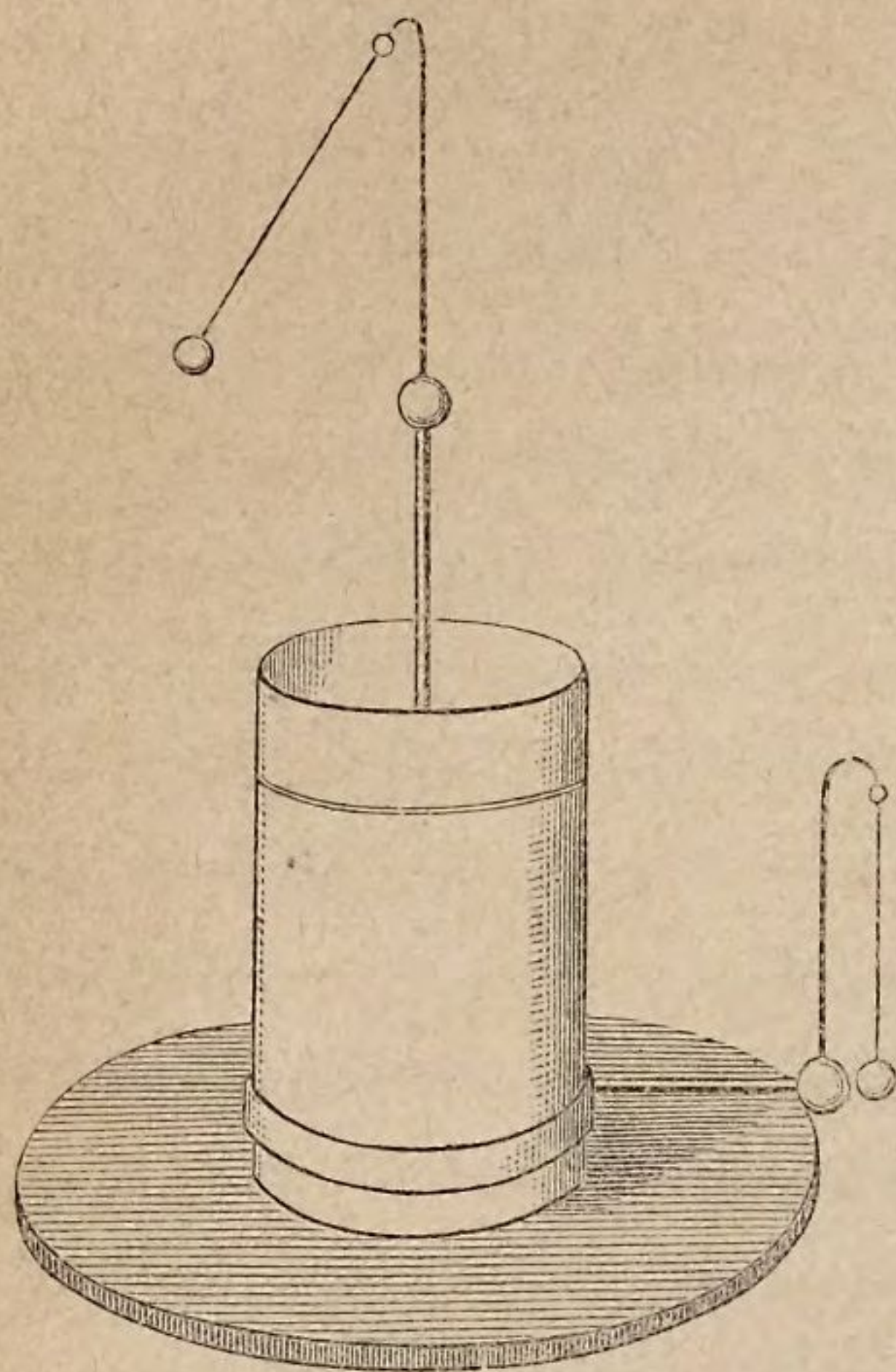
Ich verwandele unseren grossen Condensator sofort in eine *Franklin'sche Tafel*, indem ich als isolirende Schicht zwischen beide Metallplatten eine Ebonitplatte von grösserem Durchmesser lege. Ich verbinde die untere Platte mit dem Erdboden, die obere mit dem einen Conductor der Influenzmaschine. Die Tafeln sind nun geladen und wenn ich beide durch einen Draht (Entlader) mit einander verbinden will, so springt ein kräftiger Funke dem genäherten Draht entgegen. Lade ich von Neuem, nehme die obere Metallplatte, dann die Ebonitplatte ab und berühre alle Platten einzeln mit der Hand, lege sie dann wieder auf einander, so erhalte ich dennoch beim Entladen einen Funken; die Electricitäten hatten sich einander so weit als möglich genähert und hielten sich gegenseitig auf den beiden Flächen des Isolators fest. Um sie da fortzuschaffen, müssten wir jeden Punkt der einen Seite des Isolators mit dem gegenüberliegenden leitend verbinden oder, was einfacher ist, alle Punkte der einen Seite unter einander durch die eine Metallplatte, alle Punkte der anderen durch die andere, und dann wieder beide Platten unter sich.

Von dieser Franklin'schen Tafel unterscheidet sich die *Leydener Flasche* nur durch ihre Gestalt. Der Isolator ist hier ein Glasbecher, der innen und aussen mit Stanniol beklebt ist, oben aber einen unbelegten Rand hat. Ich setze eine solche Flasche auf die isolirende Ebonitplatte und führe — El: vom Conductor in die innere Belegung. Ich hebe diese Verbindung auf, und versuche, wie vorher, zu entladen. Das Resultat ist sehr gering, denn die Dichtigkeit am Zuleitungsknopf war bald so gross, dass keine Electricität mehr eintreten konnte. Ich beginne den Versuch von Neuem, verbinde aber die äussere Belegung leitend mit dem Erdboden. Ich lade mit derselben Anzahl von Scheibendrehungen der Maschine. Die Entladung liefert jetzt einen laut schal-

lenden Funken, denn nun erst hat die Flasche als Verstärkungsapparat gewirkt.

Ich befestige an dem äusseren, wie an dem inneren Belege ein Electroskop, lade die Flasche und setze sie auf die Ebonitplatte. In dem

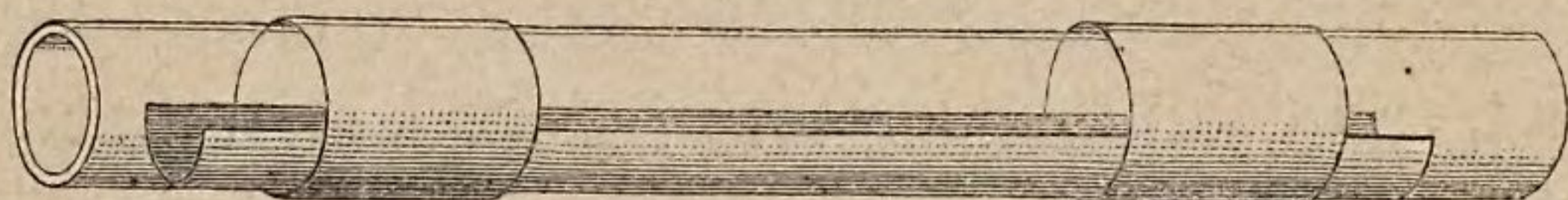
Fig. 8.



äusseren Belege ist keine Spannung vorhanden, denn er war mit dem Erdboden in Verbindung. Das Electroskop des inneren zeigt dagegen Spannung an. Ich berühre den Knopf des inneren Beleges mit dem Finger, sogleich fällt das zugehörige Electroskop, weil die Spannung verschwunden ist, dagegen zeigt nun das äussere Electroskop eine Spannung an. Durch fortgesetzte Wiederholung dieser Berührungen der beiden Belege könnte endlich die Flasche entladen werden; durch directe Verbindung beider aber gleicht sich die Electricität höherer Spannung mit der niederer aus und die Flasche wird plötzlich entladen.

Ich lege eine Glasröhre, welche innen mit einem langen Stanniolfstreifen, aussen mit zwei Stanniolringen beklebt ist, und so gewissermaassen zwei unter einander verbundene Flaschen vorstellt (Schlagröhre),

Fig. 9.

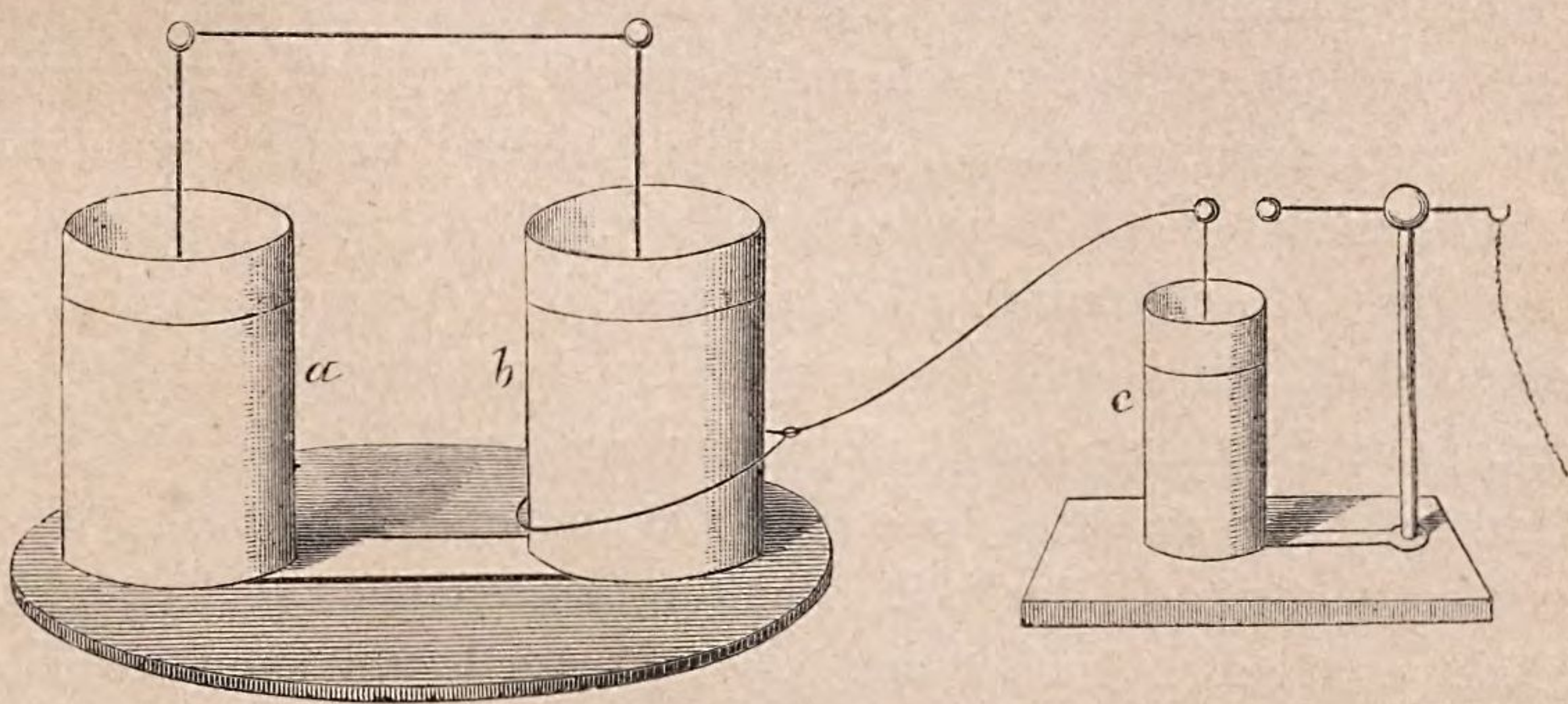


mit den beiden Ringen auf die beiden Messingarme der Maschine. Die Röhre ladet und entladet sich jetzt beständig, so dass an die Stelle des früheren gleichmässigen Funkenstromes eine Reihe von Schlagentladungen treten, die noch heftiger werden, wenn ich die Schlagröhre wirklich durch zwei leydener Flaschen ersetze, deren äussere Belege mit einander in Verbindung stehen. Ziehe ich, während die beiden Messingarme der Maschine durch die Schlagröhre mit einander verbunden sind, die Knöpfe so weit auseinander, dass keine Funken mehr zwischen ihnen überschlagen können, so nehmen wir das Resultat der vorher erwähnten Stauung deutlich wahr. Die Maschine erlischt nicht, aber die rückströmenden Electricitäten werden benutzt, um die Maschine und damit auch die Schlagröhre in entgegengesetztem Sinne zu laden. Sie

hören den intermittirenden Gang der Maschine und sehen den Wechsel des positiven und negativen Glimmlichtes an den beiden Kämme.

Die Verbindung mehrerer Leydener Flaschen untereinander kann auf zwei Weisen geschehen. Verbindet man alle äusseren Belege unter sich und alle inneren unter sich, so erhält man eine *electrische Batterie*, welche in jeder Beziehung denselben Dienst leistet, wie eine einzige Flasche, deren Belege so gross sind, wie die Belege jener Flaschen zusammengenommen. Isolirt man dagegen alle äusseren Belege, verbindet jeden äusseren Beleg mit dem inneren der nächsten Flasche und den letzten äusseren mit dem Erdboden, so erhält man eine *Cascadenbatterie*. Man ladet nur die erste Flasche direct, aus ihrem äusseren Beleg wird die nicht gebundene Electricität in die folgende Flasche getrieben u. s. f., so dass jede folgende Ladung etwas schwächer ausfällt. Durch eine nach diesem Princip hergestellte Verbindung erhalten wir ein Mittel, die Electricitätsmenge zu messen, welche in eine Flasche oder Batterie geladen wird.

Fig. 10.



Ich stelle die electrische Batterie a b, welche ich laden will, auf die Ebonitplatte und verbinde ihre äusseren Belege mit dem Knopfe einer kleineren Flasche c, deren äusserer Beleg mit dem Erdboden verbunden ist. Dem Knopfe von c ist ein zweiter Knopf, der ebenfalls mit dem Erdboden verbunden ist, nahe gegenübergestellt. Lade ich nun die Batterie a b aus dem Conductor, so ladet sich die *Maassflasche* c par cascade und entladet sich jedesmal, sobald die Dichtigkeit in ihren beiden Knöpfen eine gewisse Grösse erreicht hat. Die Zahl dieser Entladungen ist das Maass für die in die Batterie geladene Electricitätsmenge. Wenn daher die Maassflasche eine gleiche Funkenzahl angiebt, so ist auch eine

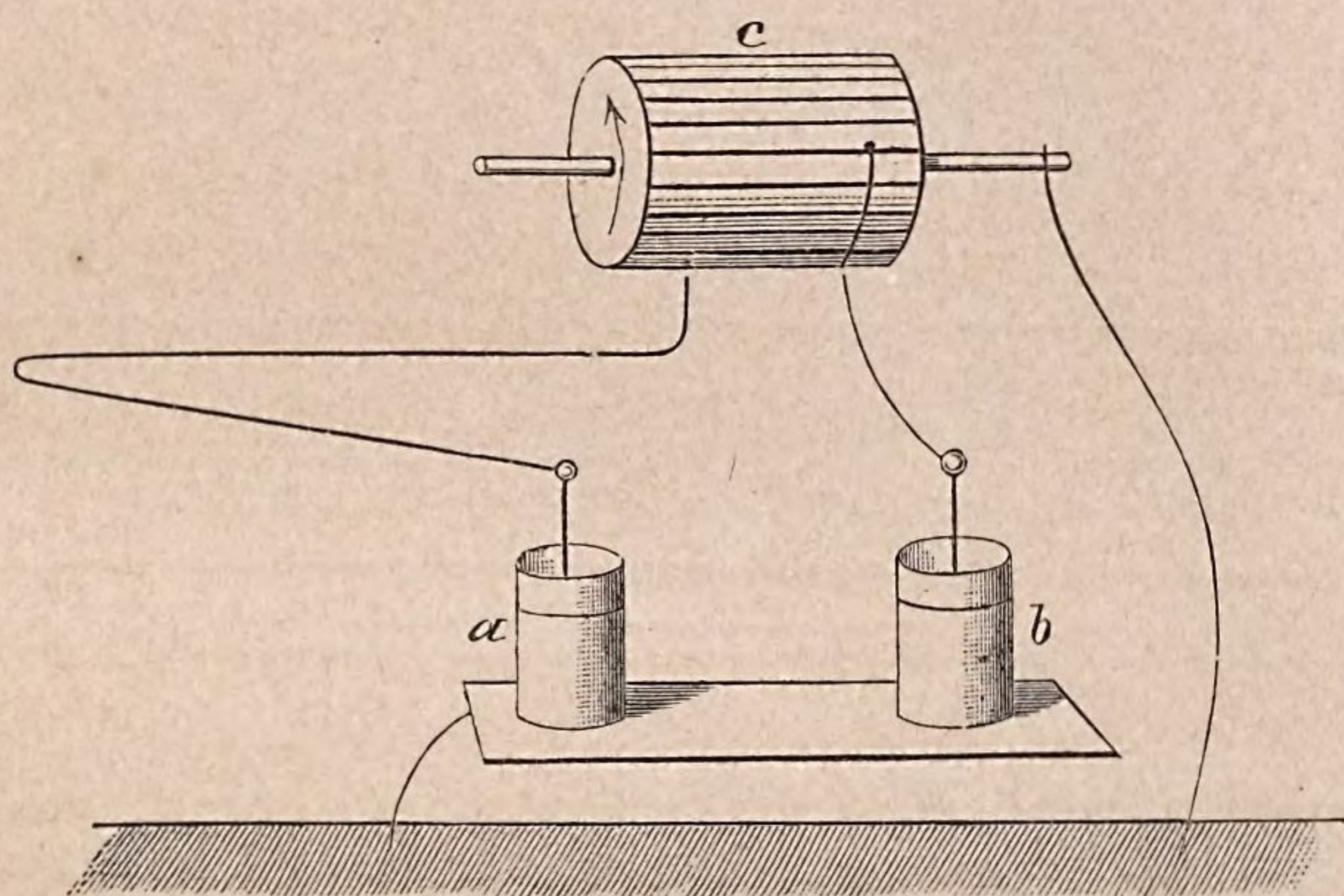
gleiche Electricitätsmenge in die Batterie gelangt, und wenn ich jetzt den Abstand messe, bis auf welchen ich zwei mit den beiden Batteriebelegen verbundene Kugeln einander nähern muss, um einen Entladungsfunken zu erhalten, so wird dieser Abstand, die *Schlagweite*, immer dieselbe sein. Lade ich die Batterie stärker, so dass die Maassflasche die doppelte Funkenzahl anzeigt, so wird auch die Schlagweite verdoppelt. Wenn ich jetzt die Batterie a b verändere, indem ich die Zahl der angewandten Flaschen vergrössere, die Grösse der einzelnen Flaschen aber unverändert lasse, so habe ich die Oberfläche der Batterie vergrössert. Untersuche ich nun wieder die Schlagweite, nachdem die Batterie bis zur selben Funkenzahl der Maassflasche geladen war, wie vorher, so wird sie in demselben Verhältniss kleiner ausfallen, wie sich die Oberfläche vergrössert hatte. Die Dichtigkeit der Electricität in den Kugeln und auch die in der ganzen Batterie hat sich durch das Anwachsen der Oberfläche verringert.

Die Entladung der Batterie geht in der Regel plötzlich vor sich, so plötzlich, dass wir ihre Zeitdauer nicht messen können. Ich setze hier einen Farbenkreisel in schnelle Drehung. Er ist mit abwechselnd rothen und gelben Sektoren bemalt, deren Farben uns zu Orange gemischt erscheinen, weil wir sie schnell hintereinander mit denselben Netzhautstellen sehen. Betrachten Sie aber den Kreisel, während er im Dunklen nur durch einzelne Entladungsfunken beleuchtet wird, so erscheinen die Farben völlig ungemischt und scharf gegeneinander abgegrenzt. Die Zeitdauer der Funken war zu kurz, um die Mischung der Farben im Auge zu ermöglichen. Nicht immer erfolgt indess eine Entladung so momentan. Durch Einschaltung eines langen schlechten Leiters wird sie verzögert. Auch durch gar zu kurze Leiter kann sie in eigenthümlicher Weise verzögert werden; die beiden Electricitäten schiessen nämlich bei der Entladung über ihr Ziel zum Theil hinaus, laden damit die Flasche verkehrt, oscilliren mehrmals zwischen beiden Belegen und bringen dann erst die volle Entladung zu Stande. In keinem Falle kann übrigens bei blosser Annäherung der beiden entladenden Knöpfe die Entladung ohne Weiteres vollendet sein. Zunächst geht eigentlich nur der Ueberschuss der Electricität von einer Kugel zur anderen, welcher sich bei der immer mehr anwachsenden Dichtigkeit nicht mehr halten kann. Dieser durchbricht die Luftstrecke zwischen den Kugeln, verdünnt dadurch die Luft und bahnt so den Weg, auf welchem die übrige Ladung nachfolgt. Aber nicht die ganze. Die Luft schliesst sich wieder und

wenn wir die Kugeln bedeutend näher aneinander bringen, so springen noch kleine Funken über. Die ganze Entladung setzt sich also aus Partialentladungen zusammen.

Von der Zeit, während welcher eine electriche Entladung vollendet wird, ist wohl zu unterscheiden die Zeit, welche die Electricität braucht, um irgend einen Leiter zu durchlaufen. Ueber diese Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Electricität sind sehr verschiedene Angaben gemacht, fast alle durch Nebenumstände beeinflusst. Aus theoretischen Gründen scheint der Electricität dieselbe Geschwindigkeit (über 40000 Meilen in der Secunde) zuzukommen, wie dem Lichte. In der That kommt die neueste Messung, die von Siemens ausgeführte, dieser Anschauung nahe.

Fig. 11.

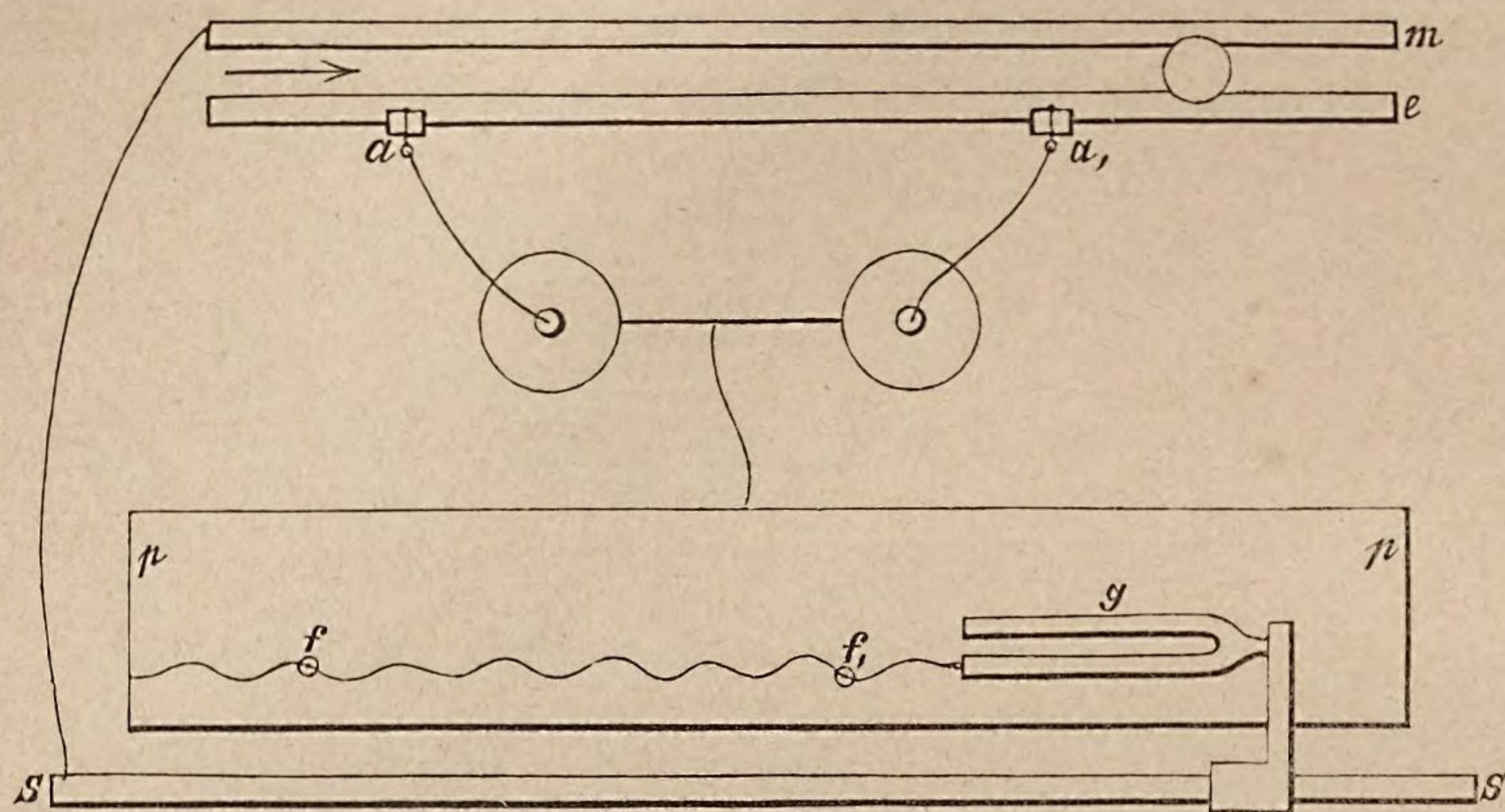


Ein Stahlcylinder *c* rotirt mit grosser Geschwindigkeit (100 Umdrehungen in der Secunde) um eine Axe. Zwei gleiche Leydener Flaschen, *a* und *b*, werden gleich stark geladen, ihre äusseren Belege sind untereinander verbunden, von jedem der inneren ist ein Draht bis nahe an die Cylinderoberfläche geführt. Verbindet man nun die äusseren Belege mit dem Erdboden, mit dem auch die Cylinderaxe leitend verbunden ist, so springen zwei Entladungsfunken auf die Mantelfläche und hinterlassen dort zwei nebeneinander liegende Funkenspuren. Wiederholt man den Versuch, nachdem man in den Entladungsbogen der Flasche *a* einen langen Telegraphendraht eingeschaltet hat, so springen beide Funken nicht mehr gleichzeitig; bis die Entladung durch den langen Draht eintritt, hat sich der Cylinder um eine Strecke gedreht, die beiden Funkenspuren sind also um eine Bogenstrecke gegeneinander verschoben, welche

als Maass der während der Bewegung der Electricität durch den langen Draht verflossenen Zeit dient.

Die Funkenspuren können zum Markiren der Zeit auch bei anderen Versuchen mit Vorthail angewandt werden. Ich zeige Ihnen hier ein *Vibrationschronoskop*, mit dem ich die Zeit bestimmen will, den diese Eisenkugel braucht, um auf einer schiefen Ebene von einem Punkte bis zu einem anderen zu gelangen. Die Ebene besteht aus zwei Schienen,

Fig. 12.



einer von Messing, m, und einer von Ebonit, e. An letzterer sind die zwei Grenzpunkte für unsere Fallbewegung durch die beiden Messingknöpfe a und a', festgestellt. Diese beiden Knöpfe stehen mit den beiden inneren Belegen zweier gleich stark geladener Leydener Flaschen in Verbindung, deren äussere Belege aber sind unter sich und mit einer Weissblechplatte p p leitend verbunden, welche zuerst roth firnissirt und darüber berusst ist. Ziehe ich eine tönende Stimmgabel g über diese Platte, so schreibt sie mit einer metallenen Schreibspitze eine Wellenlinie, welche auf schwarzem Grunde roth erscheint, und ist dabei die Gabel durch die Schlittenschiene s hindurch mit der Messingschiene der schiefen Ebene verbunden, so entladet sich erst die eine, dann die andere der Flaschen in den Momenten, wo die an jedem der Knöpfe vorbeierollende Kugel die Leitung bis auf eine sehr kleine Schlagweite schliesst. Die Entladungsfunken springen durch die Schreibspitze der Gabel und durchbrechen die Lackschicht der Platte, so dass Sie jetzt in der rothen Wellenlinie zwei weisse, von einem Hofe, in dem der Russ fortgeschleu-

dert ist, umgebene Funkenspuren f und f , finden werden. Da mir die Zahl der Schwingungen, welche die Gabel in einer Secunde macht, bekannt ist (es sind 500), so kann ich aus dem an den Wellenbögen abgezählten Abstände beider Spuren die während des Falles verflossene Zeit messen. Ich hätte ebensogut als die beiden Momente, deren Zeitdifferenz gemessen werden soll, einen wählen können, in welchem durch dieselbe Operation die eine Flasche entladen wird, durch welche ein Nerv gereizt worden ist, während die zweite Flasche durch die dem Reize folgende Muskelcontraction selbst entladen worden wäre.

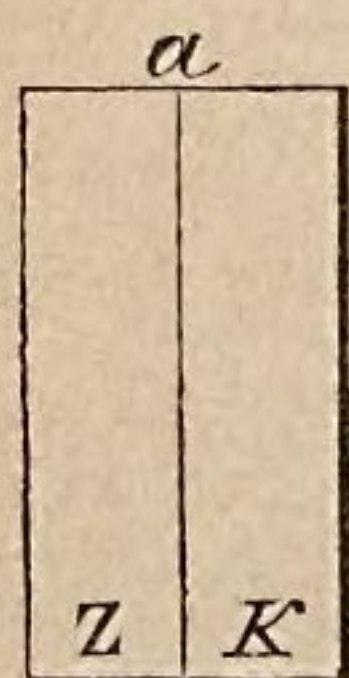
DRITTER VORTRAG.

Meine Herren!

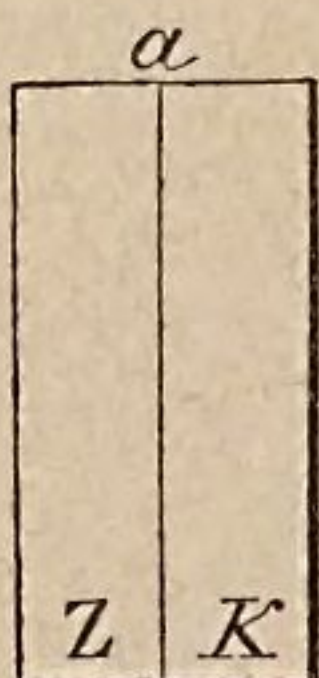
Nachdem ich in meinen beiden ersten Vorträgen eine reichliche Menge von Material zusammengetragen habe, die dazu dienen sollte, die Begriffe, mit denen wir zu thun haben, festzustellen, gehe ich nunmehr zu meiner Hauptaufgabe über, das Zustandekommen und das Wesen des electrischen Stromes zu erörtern.

Wenn zwei Stücke aus verschiedenem Metall, z. B. Zink und Kupfer, miteinander berührt werden, so werden beide electrisch, das

Fig. 13.



$+e, -e$



$+2e, 0$

Zink positiv, das Kupfer negativ. Ich zeige Ihnen diesen Versuch mit Hilfe des Condensators, den ich hier auf den Tisch stelle und des Bifilarelectroskops, das ich negativ lade. Ich drücke die isolirten Zink- und Kupferplatten aufeinander, nehme sie parallel auseinander und berühre mit dem Kupfer den Knopf des Condensators; diese Operation wiederhole ich etwa 16 mal, hebe

dann den Condensator auf und Sie sehen, dass er stark negativ geladen ist. Ich vertausche beide Platten mit einander und lade den Condensator durch das Zink positiv. Um den Versuch ganz einwurfsfrei zu machen, muss der Condensator im ersten Falle aus Kupfer, im zweiten aus Zink bestehen. Wir lernen aus diesen Versuchen, dass an der Berührungsstelle die beiden Electricitäten geschieden werden, und zwar geschieht das so, dass zwischen beiden Metallen sich eine *Spannungsdifferenz* von ganz bestimmter Grösse bildet, die nicht von der Grösse der berührenden Flächen,

sondern nur vom Material abhängig ist. Das Zink nimmt hierbei eine Spannung $+e$, das Kupfer $-e$ an, so dass die Differenz $= 2e$ ist. Wir wollen dieselbe mit a bezeichnen. Berühre ich eines der Metalle, z. B. das Kupfer, leitend, so wird seine Spannung $= 0$; da aber die Spannungsdifferenz immer $= a$ sein muss, so muss dabei das Zink die ganze Spannung $2e$ übernehmen. Der vorher angestellte *Volta'sche Fundamentalversuch* fällt deshalb noch kräftiger aus, wenn ich das Metall, welches eben nicht am Condensator geprüft werden soll, ableitend berühre. Wenn ich beide Platten gleichzeitig auf das Electroskop wirken lasse, so kann ich sogar die Hilfe des Condensators entbehren. Ich drücke beide Platten aufeinander, trenne sie, und bringe die negativ geladene Electroskopkugel zwischen beide. Sie wendet sich der Zinkplatte zu und ich kann sie mit beiden Platten im Kreise herum jagen.

Nimmt man statt der genannten Metalle andere, so erhält man andere Werthe der Spannungsdifferenz und kann so die Metalle und einige sich ähnlich verhaltende Körper wieder in eine Reihe ordnen, in der jeder Körper mit einem der folgenden berührt positiv, mit einem der vorhergehenden berührt negativ electrisch wird. Das ist die *Spannungsreihe*. An ihrem positiven Ende steht Zink, es folgen Kupfer, Silber, Platin, Kohle und, als die negativsten, Metalloxyde. Nennen wir beispielsweise die Spannungsdifferenz zwischen Zink und Kupfer, welche wir mit $\text{Zn} | \text{Cu}$ bezeichnen $= 100$, so ist $\text{Cu} | \text{Ag} = 9$ und $\text{Ag} | \text{Pt} = 14$. Die Spannungsdifferenz in entgegengesetztem Sinne betrachtet würden wir dann mit $\text{Cu} | \text{Zn} = -100$ bezeichnen. Wählen wir aus dieser Reihe zwei beliebige Körper aus und untersuchen ihre Spannungsdifferenz, so gilt das *Gesetz der Spannungsreihe*: die Differenz zwischen zwei beliebigen Gliedern derselben ist gleich der Summe der Spannungsdifferenzen aller zwischenliegenden Glieder, z. B.

$$\text{Zn} | \text{Pt} = \text{Zn} | \text{Cu} + \text{Cu} | \text{Ag} + \text{Ag} | \text{Pt}.$$

Bilden wir aus solchen Stoffen eine in sich geschlossene Kette, so findet gar keine Electricitätserregung in derselben statt, weil jede Spannungsdifferenz durch die entgegengesetzte aufgehoben wird; z. B. haben wir an den drei Contactstellen eines aus Zink, Kupfer und Silber bestehenden Ringes die drei Spannungsdifferenzen

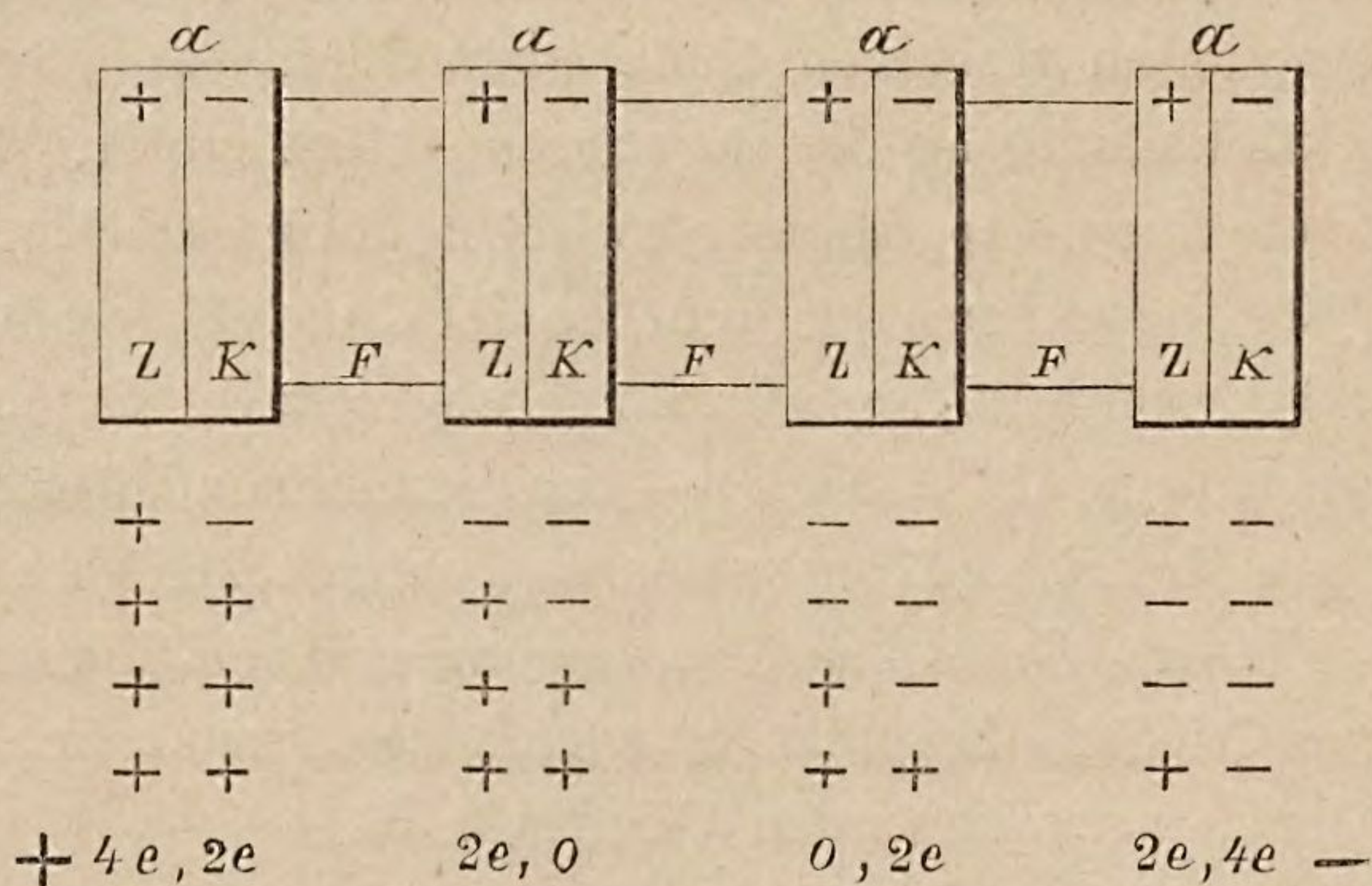
$$\text{Zn} | \text{Cu} + \text{Cu} | \text{Ag} + \text{Ag} | \text{Zn},$$

welche zusammen 0 geben, da $\text{Ag} | \text{Zn} = -\text{Zn} | \text{Cu} - \text{Cu} | \text{Ag}$ ist.

Wenn wir daher eine ganze Reihe von Zink- und Kupferplattenpaaren abwechselnd aneinander reihen, so dass eine jede Platte die vorhergehende

und die folgende mit ihrer ganzen Oberfläche berührt, so wird dieses ganze System an seinen beiden Enden nur die einfache Spannungsdifferenz $a = 2e$ zeigen und zwar wird die äusserste Zinkplatte $+e$, die äusserste Kupferplatte $-e$ zeigen, wenn das ganze System isolirt ist, dagegen die äusserste Zinkplatte $+2e$ und die Kupferplatte gar nichts, wenn diese leitend berührt wird. Der Grund, weshalb nicht mehr Electricität erregt werden kann, liegt darin, dass jeder Spannungsdifferenz a an der nächsten Contactstelle die entgegengesetzte $-a$ folgt, so dass sich alle Erregungen bis auf die eine aufheben. Könnten wir zwischen je zwei Plattenpaare einen Körper einschalten, welcher zwar leitet, aber nicht durch Contact Electricität erregt, so würden uns nur die positiven Erregungen $+a$ übrig bleiben, alle entgegengesetzt gerichteten $-a$ aber würden verschwinden. Wir wollen einstweilen annehmen, die feuchten Leiter (mit verdünnter Schwefelsäure oder Brunnenwasser benetzte Tuchscheiben) hätten die verlangte Eigenschaft, so würden wir folgendes Bild erhalten:

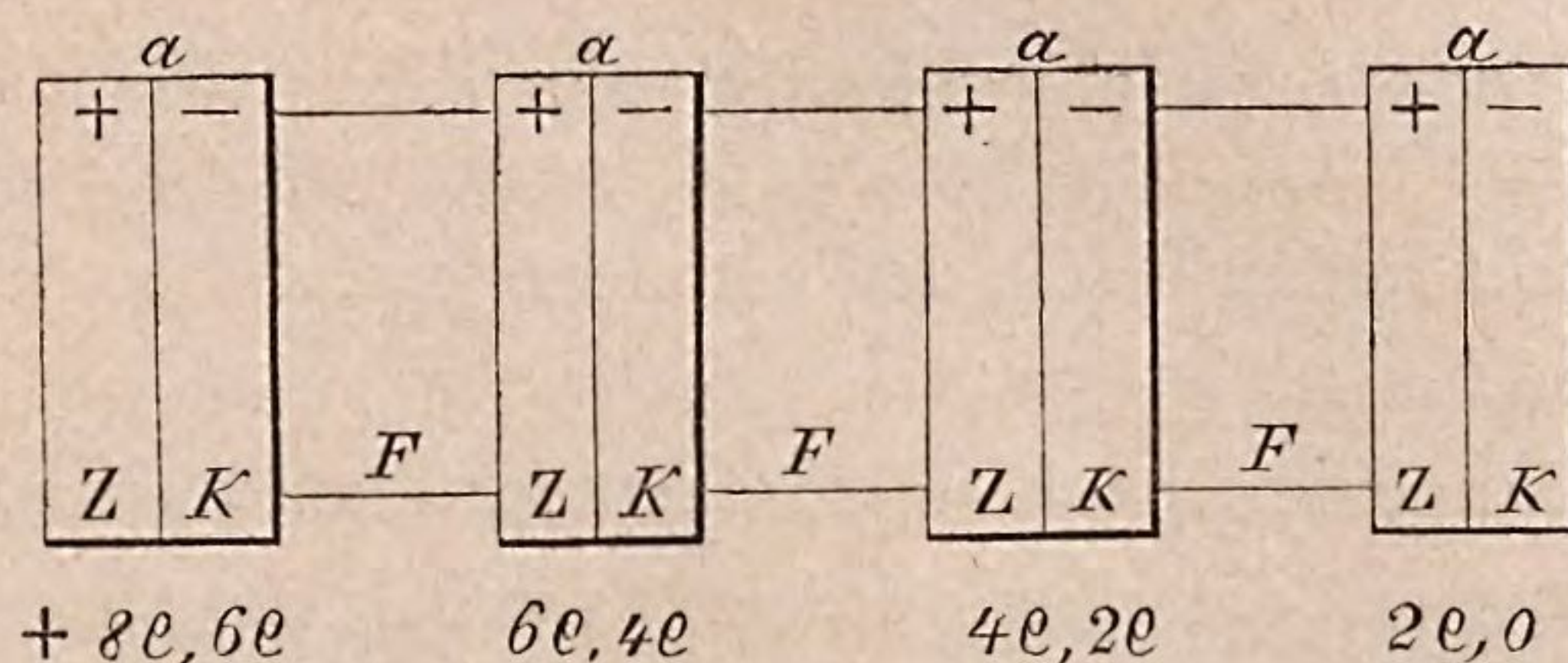
Fig. 14.



Von jedem Plattenpaare wird das Zink positiv, das Kupfer negativ. Die positiven Electricitäten werden alle nach der Seite des Zinks bis zum Ende des Systems geleitet, die negativen nach der Seite des Kupfers bis zum anderen Ende. Die entgegengesetzte Bewegung vom Erregungs-orte aus ist unmöglich, weil hier die Spannungsdifferenz a aufrecht erhalten werden muss, dagegen ist der Durchgang durch die folgenden Contactstellen möglich, da ja hier die Differenz schon durch das dort liegende erregende Plattenpaar selbst gesichert ist. So erhalten wir die *Volta'sche Säule*; an ihrem Zinkende sammelt sich die $+El$: und zwar, wenn die

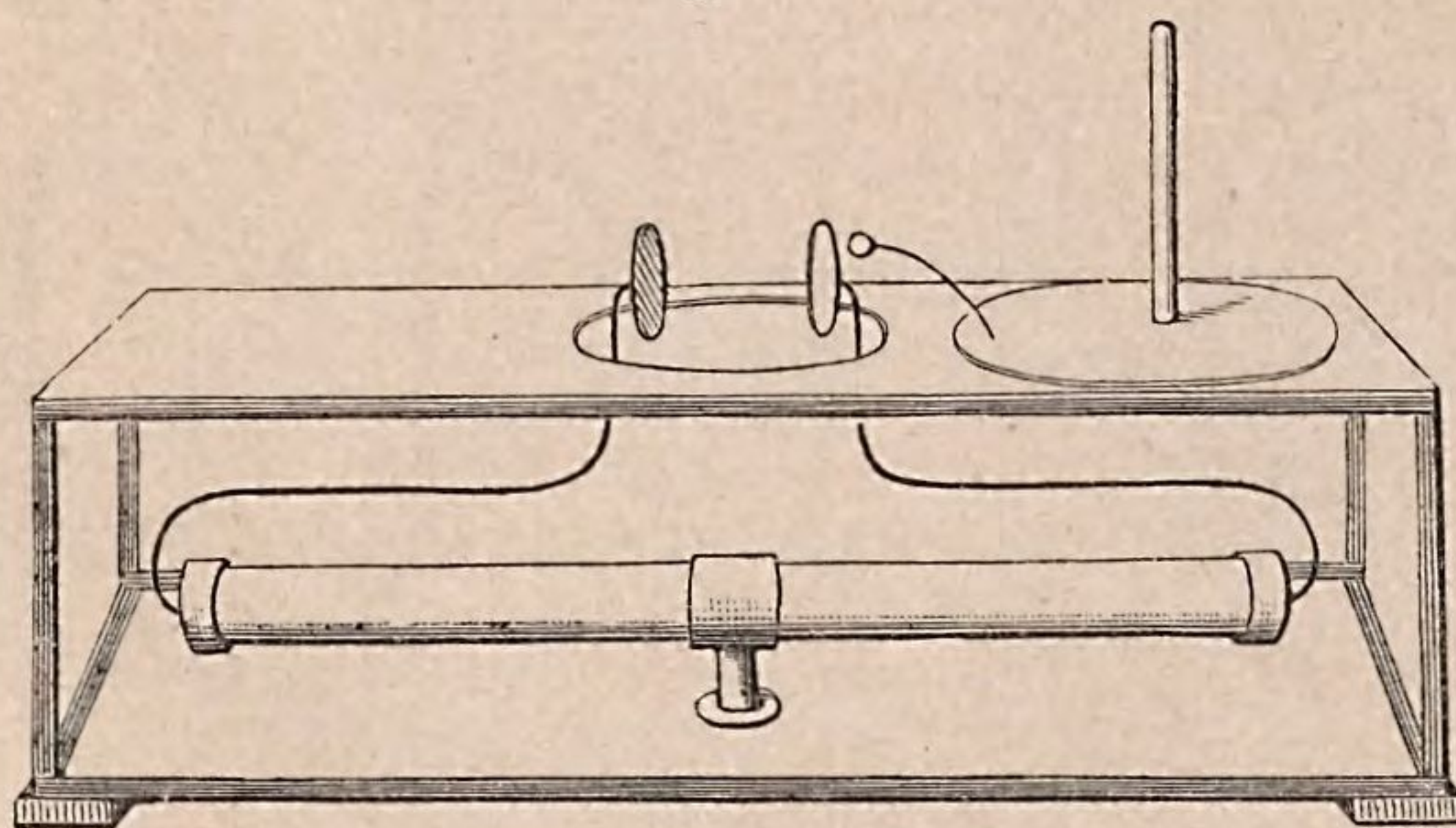
Säule aus vier Paaren besteht, in der Spannung $4e$, am Kupferende die $-El$., und zwar $-4e$, während die Mitte der Säule ohne Spannung ist. Die Enden der Säule heissen die *Pole*; der positive Pol liegt an der Zinkplatte, der negative an der Kupferplatte. Wäre die Volta'sche Säule nicht isolirt gewesen, sondern einer ihrer Pole, etwa der negative, zum Erdboden abgeleitet, so wäre seine Spannung wieder $= 0$, der andere Pol hätte dafür die doppelte Spannung $+8e$ angenommen.

Fig. 15.



Ich zeige Ihnen diese Anhäufung an den Polen einer Säule, welche aus 3500 Plattenpaaren besteht, unächtem Gold (Kupferbronce) und unächtem Silber (Zink); als feuchter Leiter ist trockenes Papier benutzt, das durch seine hygroskopische Feuchtigkeit für diesen Zweck genug leitet. Die Säule ist die *Zambonische*. Mit ihren Polen stehen zwei

Fig. 16.

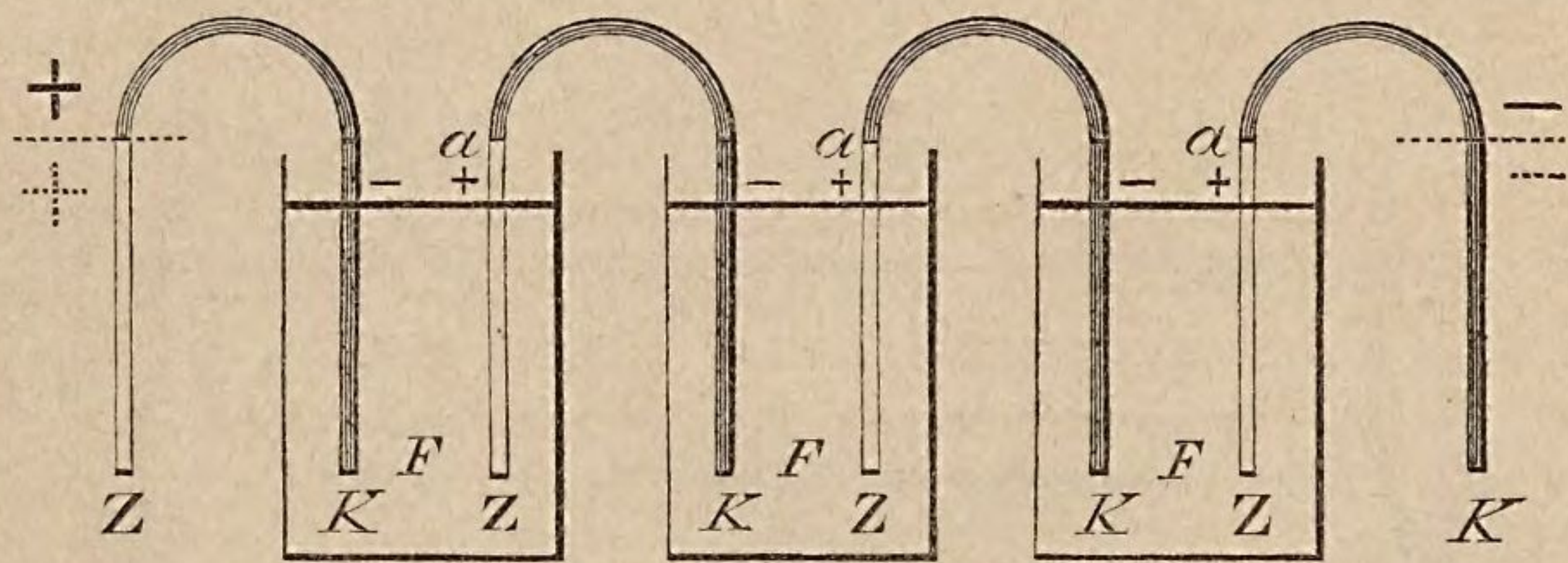


Polplatten in Verbindung, welche über den Deckel des Glaskastens, der die Säule umschliesst, herausragen. Ich setze den Condensator auf den hölzernen Deckel des Gehäuses, in welches die Säule eingeschlossen ist, so dass sein Knopf die Zinkpolplatte berührt. Er wird positiv geladen. Ich setze ihn so darauf, dass er die Kupferpolplatte berührt, und er ist negativ geladen. Ich brauche bei dieser Säule von bedeutender Span-

nung den Condensator gar nicht. Ich lasse die Kugel des Bifilarelectroskops zwischen die beiden Polplatten treten. Die Kugel wird von einer Platte angezogen, hier der positiven, weil sie negativ geladen war. Hier überladet sie sich mit $+ \text{El.}$, wird abgestossen und von der negativen Polplatte angezogen, und so spielt sie zwischen beiden Polplatten hin und her. Ersetze ich diese Electroskopkugel durch ein leichtes Aluminiumblatt, so wird dieses Spiel weit lebhafter, und wenn ich die beiden Polplatten so weit auseinander rücke, dass das Spiel des Aluminiumblattes aufhört, so liefert mir der Apparat eines der empfindlichsten Electroskope, das Fechner'sche Säulenelectroskop; denn wenn ich dem Blättchen von oben her irgend eine Electricität nähere, so wird sein unteres Ende immer nach der entgegengesetzt electrischen Polplatte hingezogen werden.

Der Aufbau einer Säule mit feuchten Tuchscheiben ist unzweckmässig, wir ersetzen dieselben besser durch flüssige Leiter, z. B. verdünnte Schwefelsäure, welche sich in Glasgefässen befindet. Die Plattenpaare berühren sich nun nicht mehr mit ihren ganzen Oberflächen, sie tauchen vielmehr in die Flüssigkeit, so dass jedes Zink mit dem Kupfer im nächsten Gefässe durch einen Kupferstreifen verbunden wird. An den Spannungsdifferenzen wird hierdurch nichts geändert, denn dieselben sind unabhängig von der Grösse der Berührungsflächen; auch an der Art der Ansammlung der Electricität an den Polen nicht.

Fig. 17.



Noch immer liegt die Zinkplatte am positiven, die Kupferplatte am negativen Pol, aber jene sowohl als diese hängen ausserhalb der Gefässe. Wir nehmen sie lieber ganz fort. Dadurch wird nur eine Contactstelle weniger im System vorhanden sein, in der isolirten Säule wird also unsere Zusammenstellung am positiven Pol nur $+ 3e$, am negativen $- 3e$ zeigen. Aber die wichtigste Veränderung für den äusseren Anblick ist die, dass nunmehr am positiven Pol die negative Kupferplatte,

am negativen die positive Zinkplatte als Polplatte auftritt. Der so erhaltene Apparat heisst eine *galvanische Batterie*, jeder einzelne Becher mit seiner Flüssigkeit und den beiden Metallplatten ein *galvanisches Element* oder eine einfache Kette und sowohl bei dem Element als bei der ganzen Batterie ist stets der + Pol da zu suchen, wo das negative Metall liegt, hier also beim Kupfer. Ich will Ihnen auch das experimentell zeigen. Ich habe hier eine 16-paarige Batterie in der von mir angegebenen Zusammensetzung, als positives Metall wirkt Zink, als negatives ein Gemisch von Braunstein und Kohle, als Flüssigkeit Salmiaklösung. Alle Elemente sind durch das Ebonitgestell gut isolirt. Ich lade den Condensator am Zinkpol, während ich den andern Pol leitend berühre. Die Ladung ist negativ. Ich lade ihn ebenso am andern Pol, und zwar positiv. Ich leite keinen der Pole ab. Wir finden den Zinkpol schwächer negativ, den Kohlenpol positiv, aber die Mitte der Säule unelectrisch. Eine zweite Säule von 40 kleinen Elementen, bestehend aus Zink, verdünnter Schwefelsäure, Salpetersäure und Platin, zeigt dieselben Erscheinungen stärker, aber doch nicht so stark, dass ich, wie bei der Zambonischen Säule, die Versuche ohne Hilfe des Condensators ausführen könnte. Die Spannungen, mit denen wir arbeiten, sind eben bei so kleiner Elementenzahl immer noch sehr klein.

Die vorher gemachte Annahme, dass die Flüssigkeiten nur leiten aber nicht Electricität erregen, ist nun aber nicht richtig. Beim Contact zweier Flüssigkeiten untereinander entsteht zwar keine merkliche Spannungsdifferenz, wohl aber bei dem von Metallen mit Flüssigkeiten. Ich lege ein mit Brunnenwasser benetztes Fliesspapier auf den Tisch, daneben stelle ich den Condensator. Nun berühre ich mit der Fläche der isolirten Zinkplatte wiederholentlich die nasse Papierfläche und übertrage die erhaltene Ladung auf den Condensator. Am Bifilarelectroskop zeigt er sich negativ geladen. In der That sind die so erhaltenen Spannungsdifferenzen recht beträchtlich, es ist z. B. $\text{Zn} | \text{verdünnte Schwefelsäure} = - 149$, $\text{Cu} | \text{Kupfervitriol} = - 21$ und $\text{Pt} | \text{Salpetersäure} = + 149$. Wir dürfen also den Metallcontact durchaus nicht als die einzige Ursache der Electricitätserregung in einer Säule ansehen, vielmehr ist die ganze an den Polen eines galvanischen Elementes vorhandene Spannung gleich der Summe aller in demselben auftretenden Spannungsdifferenzen, und der Unterschied zwischen den metallischen Leitern oder *Leitern erster Classe* und den flüssigen Leitern oder *Leitern zweiter Classe* ist nunmehr darin zu suchen, dass die ersteren dem Gesetz der Spannungsreihe

folgen, die letzteren nicht. Deshalb heben die Flüssigkeitscontacts die Wirkungen der Metallcontacts nicht auf, sie können dieselben sogar wesentlich verstärken. Die obigen Betrachtungen über die Volta'sche Säule aber bleiben ganz richtig, wenn man für jedes Element diese Summe der Contactwirkungen an die Stelle des einzigen Metallcontactes treten lässt.

Die gebräuchlichen galvanischen Elemente werden theils mit einer, theils mit zwei Leitungsflüssigkeiten construiert; im letzteren Falle befindet sich die eine Flüssigkeit in einem porösen Porcellengefässe, die andere umgiebt dieses. In jede der Flüssigkeiten taucht eins der Metalle. *Eine* Leitungsflüssigkeit enthalten die Elemente von Smee (Zink, verdünnte Schwefelsäure, platinirtes Silber), Leclanché (Zink, Salmiaklösung, Braunstein und Kohle), Stöhrer (amalgamirtes Zink, verdünnte Schwefelsäure mit Chromsäure gemischt, Kohle). In den Elementen mit *zwei* Flüssigkeiten enthält die eine Zelle amalgamirtes Zink mit verdünnter Schwefelsäure, die andere enthält Salpetersäure und in dieser bei den Grove'schen Elementen Platin, bei den Bunsen'schen Kohle, bei den Hawkins'schen Eisen; bei Daniell's Elementen enthält die zweite Zelle Kupfer in Kupfervitriol. Die Abänderungen dieses Elementes von Meidinger und von Siemens vermeiden die Thonzelle; Siemens ersetzt dieselbe durch ein Diaphragma von Papierbrei und Meidinger lässt sie ganz fort, ersetzt aber die Leitungsflüssigkeit, die das oben hängende Zink umgiebt, durch Bittersalzlösung, während das unten im Glasgefäss stehende Kupfer sich mit der schwereren gesättigten Kupfervitriollösung umgiebt.

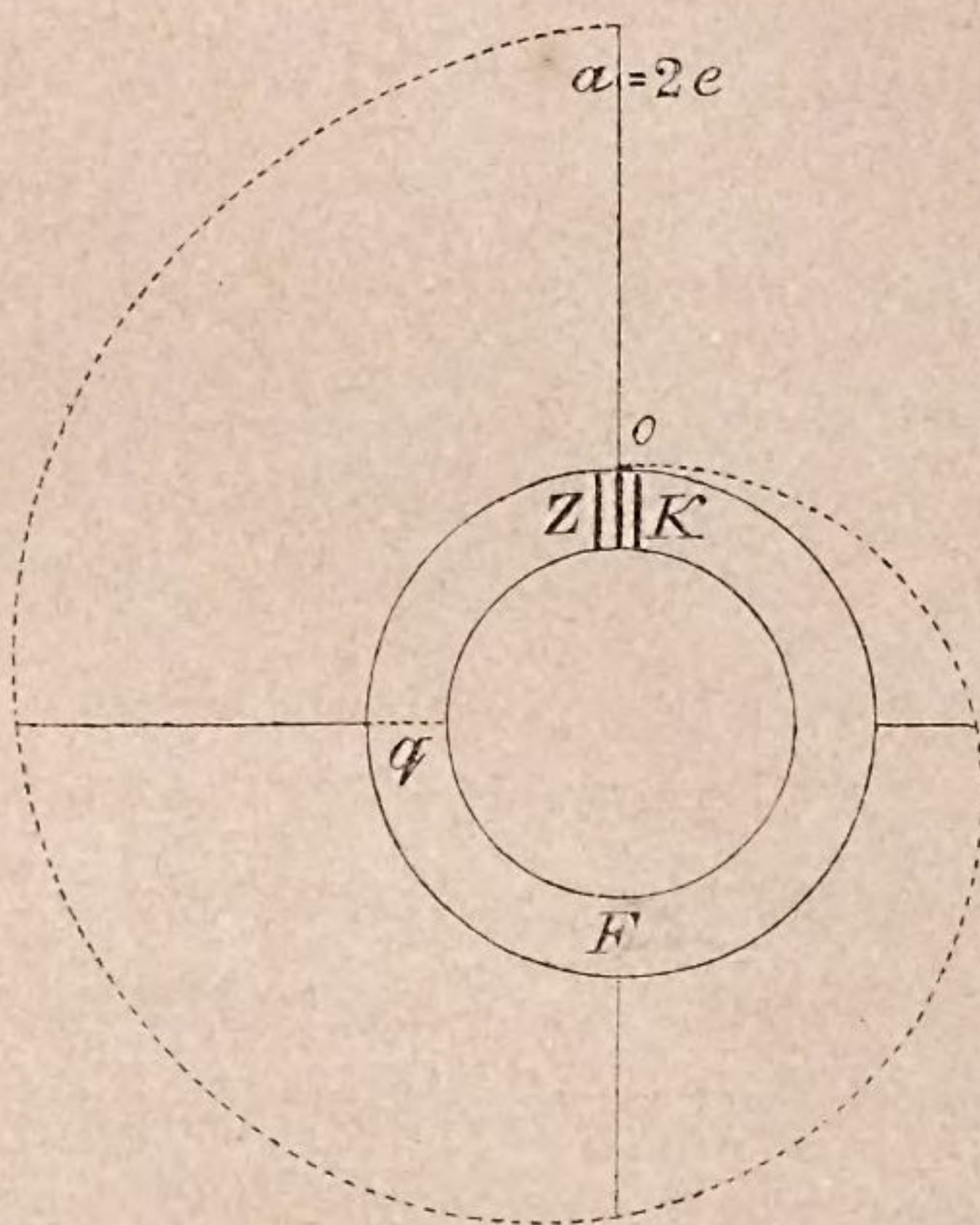
Wenn die einzelnen Spannungsdifferenzen bekannt sind, so kann man sich von der Wirksamkeit eines jeden Elementes ein Bild machen. Aus den vorher mitgetheilten Zahlen findet man z. B., warum die Grove'sche Säule eine so viel grössere Spannung liefert, als die Daniell'sche, während doch die Spannungsdifferenz $\text{Zn} | \text{Pt}$ nur sehr wenig grösser ist, als $\text{Zn} | \text{Cu}$.

Verbinden wir die Pole unserer nach alter Form aufgebauten vierpaarigen Zinkkupfersäule mit einander durch einen Kupferdraht, so gleicht sich durch diesen Leiter hindurch die Spannungsdifferenz der beiden Pole aus. Von dem positiven Pole her wird positive Electricität zum negativen, vom negativen Pole negative Electricität zum positiven Pole hin bewegt und dadurch entsteht der *electrische Strom*; als Richtung des Stromes bezeichnen wir immer die der positiven Electricität, also die vom positiven Pole durch den äussern Leiter zum negativen. Die auszugleichende Spannungsdifferenz ist aber nur $3a$, nicht $4a$, denn durch

das Anlegen des Kupferdrahtes an die äusserste Zinkplatte ist eine entgegengesetzte Spannungsdifferenz $-a$ eingeführt. Der Schluss dieser vierpaarigen Volta'schen Säule macht also die beiden äussersten Polplatten erst recht überflüssig, wir haben genau dieselbe Spannungsdifferenz $3a$, wenn wir die beiden Pole der dreipaarigen Batterie mit einander verbinden, so dass im Folgenden immer nur die Batterie oder ihr einfaches Glied, das galvanische Element, als der Apparat gedacht werden soll, an dem wir das Zustandekommen des Stromes studiren wollen.

Ich werde bei der Betrachtung der Stromentstehung von den einfachsten Bedingungen ausgehen. Ein Ring Z F K mit kreisförmigem Durch-

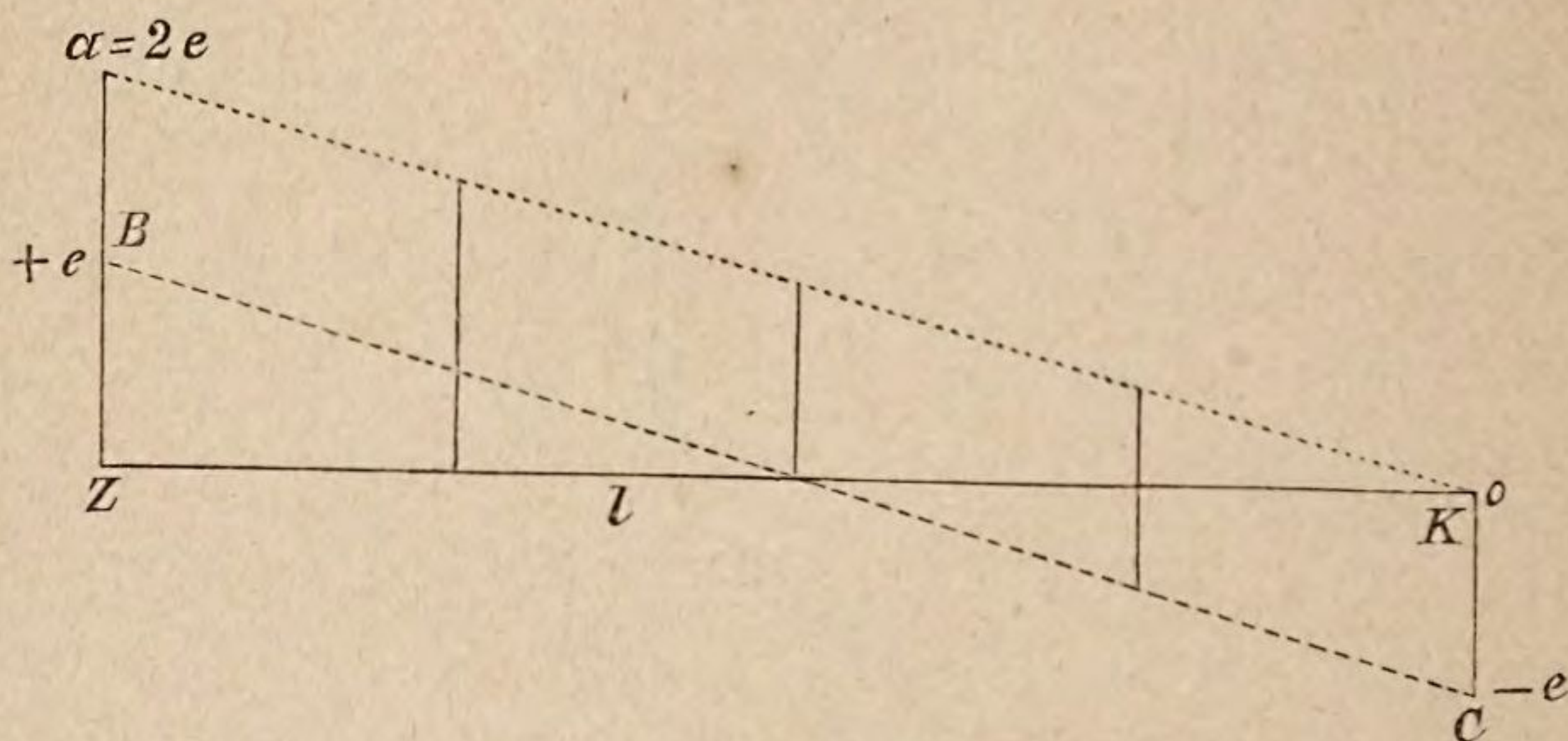
Fig. 18.



schnitt ist mit einem Leiter zweiter Classe F gefüllt. An den beiden benachbarten Punkten Z und K ist er von einer Zink- und einer Kupferplatte unterbrochen, die einander berühren. Wir wollen wieder annehmen, dass nur durch diese Berührung Electricität geschieden werde und zwar bis zur Spannungsdifferenz $a = 2e$, während die Flüssigkeit wieder nur als Leiter in Betracht kommen soll. Die Electricitäten im Zink und Kupfer würden sich im Ruhezustand nur auf den Oberflächen befinden können. In unserem Falle aber ist kein solcher Ruhezustand mehr, die Spannung an den verschiedenen Punkten des Leiters ist nicht mehr dieselbe, deshalb werden auch auf die im Innern des Leiters liegenden Punkte Triebkräfte ausgeübt und die Electricität bewegt sich von den Punkten höherer Spannung (Z) zu denen niederer Spannung (K)

durch den Ring. Der Punkt K mag wieder ableitend berührt sein, dann ist die Spannung in $Z = +2e$, in $K = 0$, von Z bis K nimmt sie stetig ab, so wie dies die um den Ring punktirt gezeichnete Curve anzeigt. Die Ausgleichung müsste eine vollständige werden, sobald die Spannung auf dem ganzen Ring die gleiche geworden ist, aber es ist eine Kraft vorhanden, welche die auf 0 gesunkene Spannung immer wieder auf die alte Höhe $a = 2e$ hebt; diese Kraft nennen wir die *electromotorische Kraft*. Sie muss der Spannungsdifferenz immer gleich sein, damit diese constant gehalten wird. Ich will den Ring ausgebreitet zeichnen. ZK ist seine Länge $= l$; die Ordinate in Z bezeichnet

Fig. 19.



die dort herrschende Spannung $a = 2e$, in K ist die Spannung $= 0$. Dieselbe Figur könnte so gefasst werden, als sei in der Höhe a über Z ein Wasserniveau, unter dessen Druck durch einen Canal Wasser nach dem tieferen Niveau K flösse. Wenn diese Bewegung fort dauern soll, so müssten wir, etwa durch eine Pumpe, das Wasser von K wieder auf die Höhe a heben; der hier aufgewandten Kraft entspricht die *electromotorische Kraft*. Da der Druck a durch den Canal constant wirkt, so muss das Strömen des Wassers mit beschleunigter Bewegung erfolgen. Ebenso müsste die Electricität von den Punkten höherer Spannung zu denen niederer beschleunigt fließen. Wenn trotz dem ein *stationärer Zustand* des Stromes, bei welchem in der gleichen Zeit immer gleiche Electricitätsmengen durch einen jeden Querschnitt des Leiters gehen, eintritt, so erklären wir das dadurch, dass ein jeder Leiter der Bewegung der Electricität einen Widerstand entgegengesetzt. Je kleiner dieser Widerstand unter sonst gleichen Umständen ist, desto grösser ist die *specifische Leitungsfähigkeit* des zur Leitung angewandten Stoffes.

Fragen wir nun, wovon die *Stromstärke*, S, d. h. die in der Zeit-

einheit durch jeden Querschnitt des Leiters gehende Electricitätsmenge abhängig ist, so finden wir aus dem Vergleich mit dem durch den Canal fließenden Wasser: 1) vom Verhältniss der Druckhöhe a zur Länge ZK .

Dieses Verhältniss, also in unserem Falle $\frac{a}{l}$, nennen wir das *Gefälle*; je grösser dieses Gefälle ist, desto grösser die Stromstärke; 2) von dem Querschnitt des Leiters (der Weite des Canals); je grösser dieser Querschnitt q ist, desto grösser die Stromstärke; 3) aber ist die Stromstärke um so grösser, je grösser die vorher definirte specifische Leitungsfähigkeit k ist, so dass sich die Stromstärke als ein Product schreiben lässt, nämlich

$$S = \frac{a}{l} \cdot q \cdot k$$

oder, wenn wir den Zähler und Nenner durch $q \cdot k$ dividiren, als ein Bruch

$$S = \frac{a}{\left(\frac{l}{q \cdot k}\right)}$$

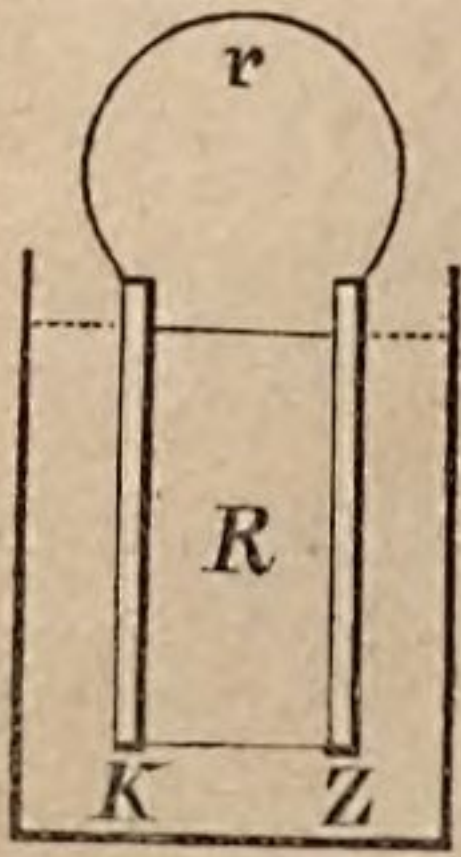
Der Zähler ist die electromotorische Kraft des Elementes; den im Nenner stehenden Ausdruck $\frac{l}{q \cdot k}$ nennen wir: den *Widerstand* des Leiters. Sie sehen, dass derselbe wächst, wenn die Länge des Leiters wächst, dass er aber abnimmt, wenn dessen Querschnitt und Leitungsfähigkeit abnehmen. Wir wollen den ganzen Widerstand $\frac{l}{q \cdot k} = w$ nennen, dann ist

$$S = \frac{a}{w}$$

und das ist der Ausdruck des *Ohm'schen Gesetzes*, das wir so aussprechen: die Stromstärke ist gleich der electromotorischen Kraft dividirt durch den Widerstand. Befinden sich in dem Ringleiter mehrere electromotorische Kräfte hintereinander, z. B. die zwischen $Zn | Cu$, $Cu | \text{Flüssigkeit}$ und $\text{Flüssigkeit} | Zn$, so bedeutet a die Summe dieser Kräfte, befinden sich in ihm verschiedene Widerstände hintereinander, so bedeutet w die Summe dieser Widerstände.

Hätte ich die Platte K im Ringe nicht ableitend berührt, so wäre die Spannung in $Z = +e$, in $K = -e$ gewesen; in der gestreckten Zeichnung würde dann BC den Gang der Spannungsabnahme andeuten; an den angestellten Betrachtungen wäre dabei nichts geändert.

Wir wollen nun dem Ringleiter mit den Metallplatten, welche er enthält, die gewöhnliche Form eines galvanischen Elementes oder einer galvanischen Batterie substituieren. Unter a ist dann die gesamte electromotorische Kraft dieser Combination, unter w die Summe aller Widerstände zu verstehen. Einen Widerstand erfährt aber der Strom in der Leitungsflüssigkeit und in dem Leiter, welcher die beiden Pole des Elementes oder der Batterie mit einander verbindet. Nennen wir den von der Leitungsflüssigkeit geleisteten Widerstand den *inneren* $= R$, den vom *äusseren* Leiter geleisteten den äusseren $= r$, so heisst nunmehr das Ohm'sche Gesetz



$$S = \frac{a}{R + r}.$$

VIERTER VORTRAG.

Meine Herren!

Es ist meine nächste Aufgabe, Ihnen zu zeigen, wie man das bisher theoretisch Abgeleitete praktisch verwerthet. Zu dem Ende müssen wir für die drei in Betracht kommenden Grössen: die electromotorische Kraft, den Widerstand und die Stromstärke bestimmte Einheiten einführen.

Als *Einheit der electromotorischen Kraft* wollen wir die electromotorische Kraft eines Daniell'schen Elementes betrachten und dieselbe mit *D* bezeichnen.

Als *Einheit des Widerstandes* soll nach Siemens' Vorschlag derjenige Widerstand gelten, den eine Quecksilbersäule von 1 Meter Länge und 1 Quadratmillimeter Querschnitt leistet; eine solche Siemenseinheit soll mit 1 S.E. bezeichnet werden. Sind diese beiden Einheiten festgestellt, so dürfen wir begreiflicher Weise für die Stromstärke nicht noch eine neue Einheit einführen, weil sie durch jene beiden bestimmt ist. Wohl aber wollen wir gleich einen Apparat kennen lernen, durch welchen man sich von dem grösseren oder kleineren Betrag der Stromstärke überzeugen kann. Das ist das *Galvanoskop* oder *Galvanometer*. Es besteht aus einer Magnetnadel, welche um eine verticale oder für die Zwecke der Demonstration besser horizontale Axe schwingen kann; im letzteren Falle ist die Nadel lothrecht gestellt.

Ein *Multiplicator*, d. h. eine Anzahl von Drahtwindungen geht bei der horizontalen Nadel über und unter, bei der verticalen vor und hinter derselben und parallel mit ihr um die Nadel herum. Leite ich einen Strom durch diese Drahtwindungen, so wird die Nadel nach der einen oder andern Seite abgelenkt, je nach der Richtung des Stromes; der

Ablenkungswinkel wächst, wenn die Stromstärke wächst, aber nicht in gleichem Verhältniss mit ihr, so dass er nicht unmittelbar ein Maass der Stromstärke ist. Die Richtung, in welcher der Strom durch das Galvanometer gehen soll, beliebig zu bestimmen, ist der Zweck der *Gyrotrope* und *Commutatoren*, während die *Stromschlüssel* einfach das schnelle Oeffnen und Schliessen eines Stromes ermöglichen.

Ich will dieses Galvanometer benutzen, um Ihnen zu zeigen, wie sich die Veränderungen der electromotorischen Kräfte und der Widerstände in den Veränderungen der Stromstärke kund geben. Ich schliesse ein grosses Daniell'sches Kupferzinkelement durch die Galvanometerleitung; die Nadel schlägt bis gegen ihre Hemmung aus. Ich schliesse durch dieselbe Leitung, aber im entgegengesetzten Sinne ein kleines Element aus meiner Braunsteinbatterie (einer Modification der Leclanché'schen) und die Nadel weicht nach der anderen Seite sehr viel schwächer ab. Im ersten Falle war also die Stromstärke grösser als im zweiten. Es wäre aber ganz falsch, hieraus einen Schluss auf die electromotorische Kraft beider Elemente ziehen zu wollen. Denn schliesse ich jetzt in die Galvanometerleitung beide Elemente hinter einander in der vorigen Stellung ein, so sehen Sie die Nadel im Sinne des Braunsteinelementes ausschlagen, es überwiegt also die electromotorische Kraft dieses kleinen Elementes über die des grossen Daniellelementes; jetzt wird nämlich dem Strom beider Elemente ein gemeinschaftlicher Widerstand geboten, so dass der grössere Galvanometerausschlag nur noch durch die grössere electromotorische Kraft bedingt sein kann.

Weiter lasse ich auf das Galvanometer erst den Strom eines sehr grossen, dann den eines sehr kleinen Daniell'schen Kupferzinkelementes wirken. Sie sehen ähnliche Unterschiede im Ausschlag, wie vorher. Ich stelle aber die beiden Elemente in entgegengesetzter Richtung in dieselbe Leitung des Galvanometers und die Nadel bleibt in Ruhe. Jetzt waren sowohl die Widerstände die gemeinsamen, als auch die electromotorischen Kräfte gleich und entgegengesetzt.

Ich zeige Ihnen ferner die Wirkung der Widerstände auf die Grösse der Stromstärke. Die Grösse des Widerstandes fanden wir wachsend mit der Länge des Leiters, abnehmend dagegen mit wachsendem Querschnitt und wachsender specifischer Leitungsfähigkeit. Einheit der specifischen Leitungsfähigkeit ist die des Quecksilbers, Einheit des Widerstandes der Widerstand, welchen eine Quecksilbersäule von 1 Meter Länge und 1 Quadratmillimeter Querschnitt leistet. Eine gleich dicke

Quecksilbersäule von 2 Meter Länge wird also den Widerstand 2 S.E., eine von 10 Meter Länge den Widerstand 10 S.E. haben. Beträgt der Querschnitt der 1 Meter langen Quecksilbersäule 10 Quadratmillimeter, so ist ihr Widerstand nur $\frac{1}{10}$ S.E. und deshalb hat eine 10 Meter lange Quecksilbersäule von 10 Quadratmillimeter Querschnitt wieder den Widerstand 1.

Wende ich statt der Quecksilbersäule Metalldrähte an von gleicher Länge und gleichem Querschnitt, wie jene, so wird deren Widerstand in dem Maasse kleiner sein, als ihre specifische Leitungsfähigkeit grösser ist, als die des Quecksilbers. Sie sehen in dieser Zeichnung eine

Fig. 21.

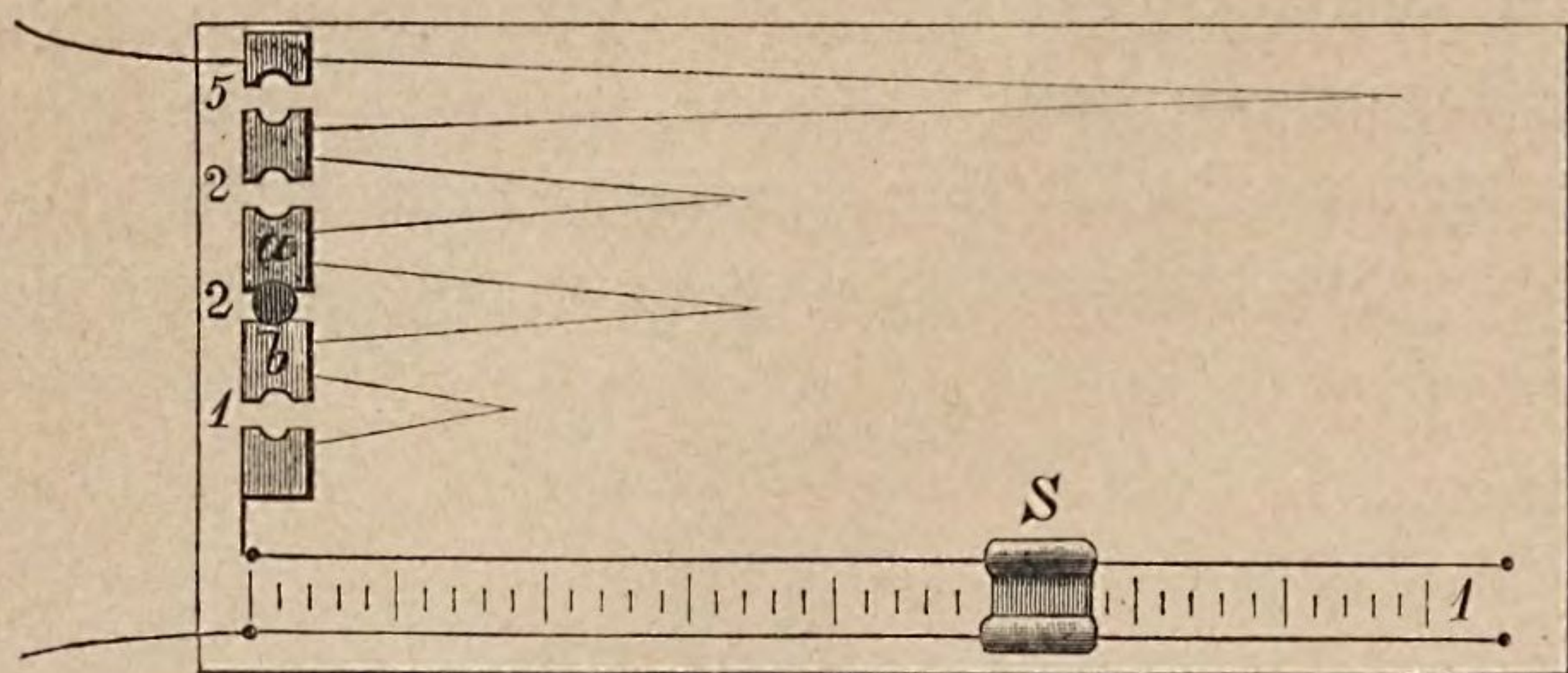
<i>Quecksilber</i>	-	1
<i>Neusilber</i>	—	4
<i>Platin</i>	—	8
<i>Messing</i>	—	13
<i>Aluminium</i>	—	32
<i>Kupfer</i>	—	56
<i>Silber</i>	—	64

Zusammenstellung der Leitungsfähigkeiten einiger metallischer Leiter. Die Länge der Striche bedeutet die relative Leitungsfähigkeit der Metalle, zugleich aber bedeutet sie auch die Länge der Drähte von diesen verschiedenen Metallen, welche sich bei gleichem Querschnitt in Bezug auf ihren Widerstand gegenseitig ersetzen. Ein Silberdraht darf 8mal so lang sein, als ein gleich dicker Platindraht, und der Platindraht wieder 8mal so lang als die gleich dicke Quecksilbersäule, um denselben Widerstand auszuüben. Wir können daher den Widerstand irgend einer Quecksilbersäule, z. B. die Widerstandseinheit oder einfache Vielfache derselben auch durch Stücke von anderen Drähten, durch Neusilber- oder Kupferdrähte von beliebiger Dicke darstellen. Ein Neusilberdraht von 2 Quadratmillimeter Querschnitt und 8 Meter Länge würde uns z. B. den Widerstand 1 S.E. repräsentiren, weil $\frac{8}{4 \cdot 2} = 1$ ist.

In dieser Holzbüchse befindet sich eine solche Siemenseinheit, durch einen aufgewickelten Draht dargestellt, und in den *Widerstands-*

messern oder *Rheostaten* haben wir ganze Sätze solcher Einheiten und ihrer Vielfachen vereinigt. In den *Stöpselrheostaten* sind je zwei dicke Messingklötze durch Drähte von den Widerständen 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100 u. s. w. S.E. unter einander verbunden. Stecke ich einen Stöpsel zwischen zwei solche Klötze a und b, so geht ein Strom von einem

Fig. 22.



Klotz zum anderen nicht durch den Widerstandsdraht, sondern durch den Stöpsel, der wegen der Kürze des Weges und der Güte des Leiters einen unmerklichen Widerstand leistet. Ich kann also durch die Stöpsel beliebige Widerstände ein- oder ausschalten, freilich nur von 1 zu 1 S.E. springend. Die *Schlittenrheostaten* vermeiden diesen Nachtheil. In ihnen sind zwei Platindrähte von gemessenem Widerstand parallel nebeneinander ausgespannt und durch einen mit Quecksilber gefüllten Schlitten s, durch den beide Drähte hindurchlaufen, mit einander verbunden. Man kann also den Strom, der an demselben Ende beider Drähte ein- und austritt, durch kürzere oder längere Leiterstücke gehen lassen. Die Vereinigung beider Rheostaten, der Stöpselverbindung für die grösseren, der Schlittenverbindung für die kleineren Widerstandsänderungen, wie sie du Bois-Reymond anwendet, ist die zweckmässigste.

Ich schliesse nun wieder den Strom unseres Daniell'schen Elementes durch die Galvanometerleitung, habe aber in diese noch einen Stöpselrheostaten und durch denselben den Widerstand 500 S.E. eingeschaltet. Der Strom ist dadurch sehr geschwächt, der Ausschlag sehr klein geworden. Stecke ich die Stöpsel nach und nach zwischen die Messingklötze, so schalte ich erst die grossen, dann die kleinen Widerstände aus und endlich ist der Strom wieder auf seine frühere Stärke zurückgekehrt.

Die Widerstände flüssiger Leiter können zum Theil ebenso gemessen

werden, wie die der Metalldrähte. Ich ersetze den Stöpselrheostaten durch eine mit Zinkvitriollösung gefüllte Röhre. Der Strom muss durch die Lösung von einem amalgamirten Zinkklotz zum anderen gehen. Ändere ich die Entfernung der beiden Klötze von einander, so ändert sich die Länge der durchflossenen Flüssigkeitssäule und damit ihr Widerstand. Eine Quecksilbersäule dürfte ungefähr 200000mal länger sein, als diese Zinkvitriollösungssäule, um denselben Widerstand auszuüben, wie sie. Je geringer daher die specifische Leitungsfähigkeit der Leitungsflüssigkeit in einem Elemente oder einer Batterie ist, je kleiner ihr Querschnitt und je länger die Strecke derselben, welche der Strom durchlaufen muss, desto grösser ist ihr Widerstand. Ich verbinde einen Zink- und einen Kupferstreifen mit den beiden Enden des Galvanometerdrahtes und tauche beide Metalle in schwach gesäuertes Wasser. Der Ausschlag der Galvanometernadel ist Anfangs gering; er zeigt eine immer grössere Stromstärke an, je tiefer ich die Streifen eintauche, d. h. je grösser der Querschnitt der durchlaufenen Flüssigkeit wird; der Strom wird aber wieder schwächer, wenn ich die beiden Metalle von einander entferne, d. h. je länger die durchlaufene Flüssigkeitssäule wird.

Mit diesen Vorkenntnissen können wir nun leicht übersehen, welche Art von Elementen wir für einen bestimmten Zweck zu wählen haben, ob grosse oder kleine, viele oder wenige. Wenn ich nicht *ein* Element, sondern beispielsweise zehn zur Batterie mit einander verbundene Elemente habe, so ist die Stromstärke

$$S = \frac{10 a}{10 R + r},$$

denn jedes Element hat die electromotorische Kraft a und den inneren Widerstand R , die ganze Batterie also die electromotorische Kraft $10a$ und den inneren Widerstand $10R$, der äussere Widerstand r aber ist lediglich abhängig von der Arbeit, welche von der Batterie geleistet werden soll und ändert sich also nicht, wenn an der Batterie etwas geändert wird.

Ist der äussere Widerstand sehr klein, wird er z. B. von einem nicht zu langen Metalldraht geboten, so kann ich r ganz vernachlässigen und die Stromstärke ist also

$$S = \frac{10 a}{10 R} = \frac{a}{R},$$

d. h. die zehnpaarige Batterie wird keine grössere Wirkung thun, als ein einziges Element. Um trotzdem den Strom recht stark zu machen,

werde ich den inneren Widerstand so klein wie möglich wählen, d. h. ein Element mit recht grossen Platten anwenden. Bleibt alles Andere unverändert, wird aber die Plattengrösse verzehnfacht, so wird der Widerstand R auf $\frac{1}{10}$ seiner Grösse reducirt, die Stromstärke wird also

$$S = \frac{\frac{a}{R}}{\frac{1}{10}} = \frac{10 \cdot a}{R}$$

Die einfache Regel, die sich hieraus ergibt, heisst: wenn der äussere Widerstand sehr klein ist, so hat man durch Anwendung *vieler* Elemente keinen Vortheil, wohl aber durch Anwendung *grosser* Elemente.

Ist aber der äussere Widerstand r bedeutend, so heisst der Ausdruck für die Stromstärke bei Anwendung von 10 Elementen

$$S = \frac{10 a}{10 R + r} = \frac{a}{R + \frac{r}{10}}$$

Ich habe also durch die Anwendung der 10 Elemente gerade denselben Vortheil erreicht, wie wenn ich statt des Widerstandes r einen 10mal geringeren eingeschaltet hätte. Der Widerstand r ist mir immer durch das anzustellende Experiment gegeben, ich kann also nichts beliebig an ihm ändern; wohl aber kann ich durch Vermehrung der Elemente in der Batterie die electromotorische Kraft derselben erhöhen. Gleichzeitig wird freilich auch ihr innerer Widerstand vergrössert, der äussere aber nicht, und darum wächst die Stromstärke gerade so, wie wenn ich electromotorische Kraft und inneren Widerstand unverändert gelassen, den äusseren Widerstand aber verkleinert hätte. In der electrotherapeutischen Praxis hat man die doppelte Aufgabe, solche Vermehrung oder Verminderung der Elementenzahl schnell und so vornehmen zu müssen, dass nicht die einmal vorhandene Verbindung gelöst wird, bevor die neue hergestellt ist, weil nur so die heftigen Stösse vermieden werden können, welche durch den Abfall der ersten Stromstärke bis auf Null und das jähe Aufsteigen bis zur neuen Stromstärke verursacht werden würden. Diese Aufgabe wird durch die Anwendung der *Stromwähler* oder der *Steckklemmen* gelöst. Ist aber die neue Verbindung hergestellt, so muss man auch Sorge tragen, dass die frühere nicht weiter fortbesteht, denn sonst bleiben ein oder einige Elemente in sich geschlossen und werden durch die heftigen in ihnen stattfindenden chemischen Prozesse unbrauchbar gemacht.

Ob nun in dem jetzt betrachteten Falle grosse oder kleine Elemente angewandt werden müssen, das ist eine zweite Frage. Ihre Beantwortung hängt von der Grösse des äusseren Widerstandes ab. Je grösser r wird, desto gleichgiltiger wird es, ob R kleiner gemacht wird, d. h. ob man grossplattige Elemente nimmt oder nicht. Je grösser r wird, desto mehr werden kleine Elemente denselben Dienst thun, wie grössere, und da sie billiger zu haben sind, so würde man sie in diesem Falle den grösseren unbedingt vorziehen, wenn sie nicht in Bezug auf die in ihnen stattfindenden electrochemischen Vorgänge ihre Schwächen hätten.

Ich will aber die Frage nach der vortheilhaftesten Elementengrösse und zwar auch mit Rücksicht auf den Kostenpunkt, an einem Beispiele bestimmter beantworten. Gesetzt, es wäre mir eine Zink- und eine Kupferplatte von gewisser Grösse zur Verfügung gestellt; ich darf daraus entweder ein einzelnes Plattenpaar mit der ganzen Plattengrösse, oder zwei Plattenpaare mit halber, oder vier Plattenpaare mit viertel Plattengrösse anfertigen. Ein Element der letztern Art soll den Widerstand R haben, während der äussere Widerstand $= r$ ist. Dann erhalten wir in den drei Fällen die folgenden Stromstärken

ganze Platte	zwei halbe Platten	vier Viertel- Platten
$\frac{a}{\frac{R}{4} + r}$	$\frac{2a}{2\frac{R}{2} + r}$	$\frac{4a}{4R + r}$

oder anders geschrieben

$\frac{4a}{R + 4r}$	$\frac{4a}{2R + 2r}$	$\frac{4a}{4R + r}$
---------------------	----------------------	---------------------

Wählen wir nun solche Widerstände, bei denen $R = r$ ist, so ist im ersten Falle der innere Widerstand r kleiner als der äussere $4r$, im letzten der innere $4r$ grösser als der äussere r , im mittleren sind beide gleich, nämlich $2r$. Die Stromstärken aber lassen sich in den drei Fällen so schreiben

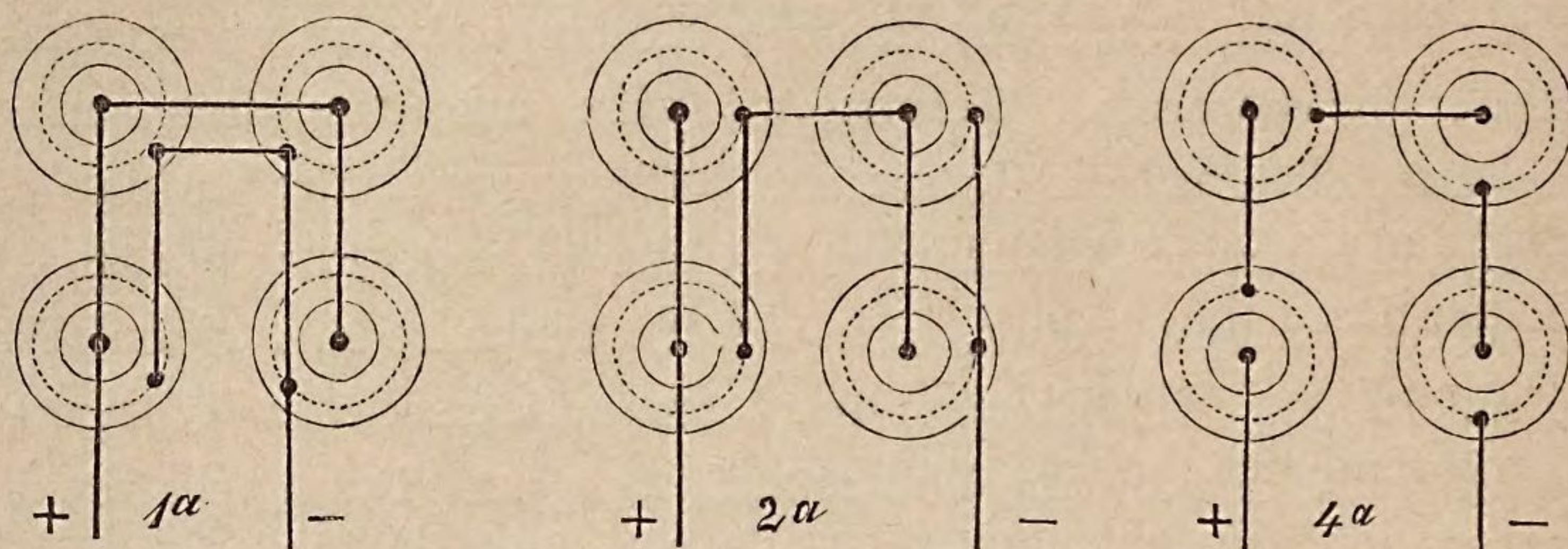
$\frac{4a}{5r}$	$\frac{4a}{4r}$	$\frac{4a}{5r}$
-----------------	-----------------	-----------------

d. h. bei gegebenen Metallflächen liefert die Säule die grösste Stromstärke, wenn die Metalle in so viele Elemente zertheilt werden, dass der innere Widerstand der Säule dem äusseren gleich ist.

Man wird nicht leicht in den Fall kommen, sich seine Elemente selbst so herrichten zu müssen, man verfügt vielmehr über eine gewisse

Anzahl, z. B. über 4 Elemente, deren jedes den Widerstand R hat. Damit können wir die drei besprochenen Stromstärken sofort herstellen, wenn wir für den ersten Fall alle Zinkplatten untereinander und alle Kupferplatten untereinander verbinden (Verbindung *nebeneinander* zum einplattigen Element), für den letzten Fall die gewöhnliche Batterie-Verbindung anwenden (Verbindung *hintereinander* zur Säule), für den mittelsten aber je 2 Elemente nebeneinander und die so erhaltenen beiden Paare hintereinander verbinden. Vorrichtungen, durch welche man

Fig. 23.



solche Verbindungen schnell mit einander vertauschen kann, heißen *Pachytrope*. Wir werden sie später gern anwenden.

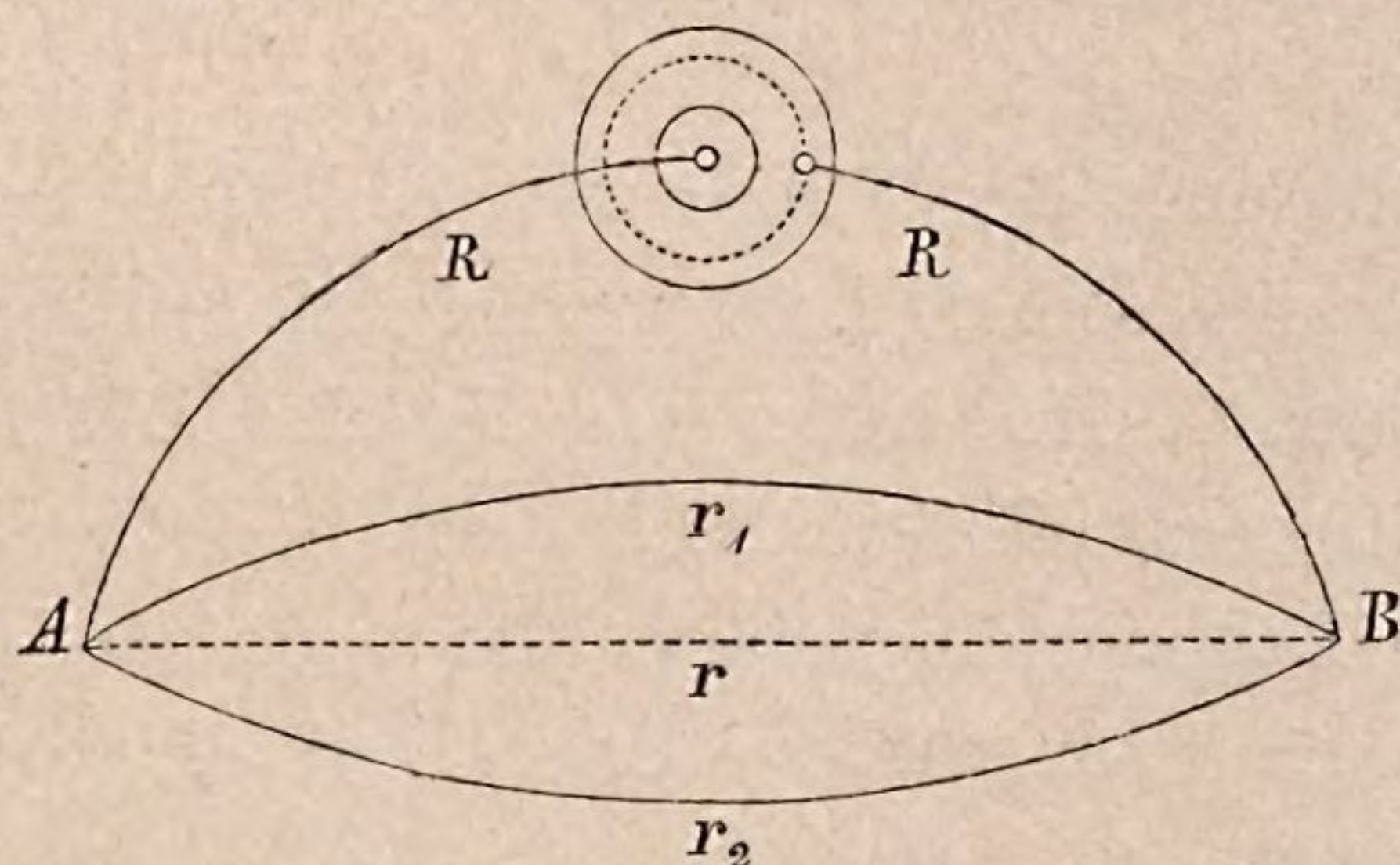
Aus einer alten, verkehrten Anschauung über das Wesen des electrischen Stromes haben sich noch einige Bezeichnungen erhalten, vor deren Anwendung nicht genug zu warnen ist. Man nennt oft noch den Strom, wie er von der Verbindung *nebeneinander* geliefert wird, den Quantitätsstrom, den von der Verbindung hintereinander den *Intensitätsstrom*. Solche Ausdrücke sollte niemand gebrauchen, der die Bedeutung des Ohm'schen Gesetzes erfasst hat.

FÜNFTER VORTRAG.

Meine Herren!

Bisher haben wir angenommen, dass der ganze Strom ungetheilt durch eine Leitung gehen soll. Nun wollen wir weiter den Fall betrachten, dass mehrere Wege nebeneinander sich gleichzeitig der Bewegung der Electricitäten darbieten; den Fall der *Zweigströme*.

Fig. 24.



Der Strom einer Batterie soll ungetheilt bis zu den beiden Punkten A und B gehen, dann aber soll sich die Leitung in mehrere Zweige spalten, z. B. in drei Zweige mit den Widerständen r_1 , r_2 , und r_3 . Wir können uns dann immer einen Leiter vom Widerstande r zwischen A und B ausgespannt denken, dessen Leitungsfähigkeit ebenso gross ist, wie die jener Zweigleiter zusammengenommen. Diese Leitungsfähigkeiten sind aber $\frac{I}{r_1}$, $\frac{I}{r_2}$ und $\frac{I}{r_3}$, und die des gedachten Leiters mit dem Widerstande r ist $= \frac{I}{r}$, denn die Leitungsfähigkeiten der Körper verhalten

sich umgekehrt, wie ihre Widerstände; also muss $\frac{I}{r} = \frac{I}{r_1} + \frac{I}{r_2} + \frac{I}{r_3}$ sein. Betrachten wir nur den einfacheren Fall, in welchem die Zahl der Zweigleiter gleich zwei ist, dann würde $\frac{I}{r} = \frac{I}{r_1} + \frac{I}{r_2}$, also $r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$ sein müssen. Soll also die Stromstärke dieselbe sein, ob ich den Strom durch den gedachten Leiter r allein, oder an dessen Stelle durch die beiden Zweigleiter gehen lasse, so muss ich für den Ausdruck der Stromstärke

$$S = \frac{a}{R + r}$$

(wo R der Widerstand der ganzen unverzweigten Leitung ist) schreiben können

$$S = \frac{a}{R + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}$$

Ein Zahlenbeispiel wird diese Berechnung erläutern. Ich nehme an, der Widerstand des Leiters r_1 sei $= 1$.S.E., der des Leiters $r_2 = \frac{1}{2}$.S.E., dann ist die Leitungsfähigkeit des ersten $= 1$, die des zweiten $= 2$. Durch die unverzweigte Leitung geht der ganze Strom, d. h. drei Drittel, durch den gedachten Leiter r müssten dieselben drei Drittel gehen. Theilt sich aber der Strom zwischen den beiden Leitern, so geht durch jeden ein seiner Leitungsfähigkeit entsprechender Strom-antheil, nämlich durch den Leiter r_1 geht ein Drittel, durch r_2 gehen zwei Drittel des Stromes, die Stromstärken in den Zweigen verhalten sich *gerade* wie deren Leitungsfähigkeiten, also *umgekehrt* wie deren Widerstände; die genannte Stromstärke aber, wie sie durch die unverzweigte Leitung geht, beträgt

$$S = \frac{a}{R + \frac{1 \cdot \frac{1}{2}}{1 + \frac{1}{2}}} = \frac{a}{R + \frac{1}{3}}$$

Hier ist $\frac{1}{3}$.S.E. der Widerstand, den der gedachte Draht hätte haben müssen, um die beiden Zweigdrähte zu ersetzen, seine Leitungsfähigkeit ist nämlich dann $= 3$, während die beiden Zweigdrähte zusammen die Leitungsfähigkeiten $1 + 2$, d. h. ebenfalls 3 gehabt haben würden.

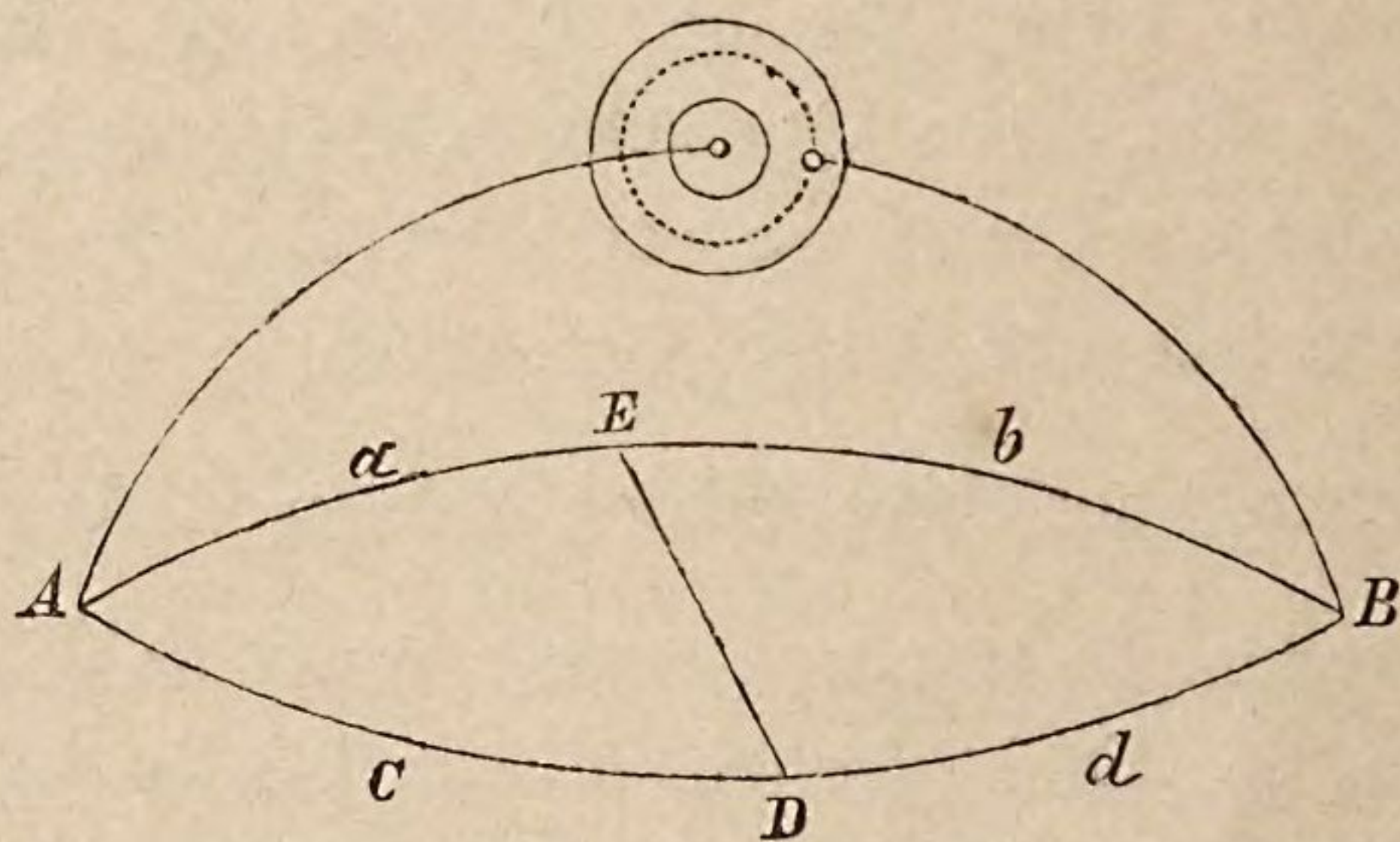
Ich will bei dieser Gelegenheit einen neuen Begriff einführen, der oft, und zwar gerade an der Stelle, von der hier die Rede ist, missverstanden wird. Es ist der Begriff *Stromdichte*. Unter Stromdichte verstehen wir die Stromstärke dividirt durch den jedesmaligen Querschnitt des Leiters, also die durch die Querschnittseinheit in der Zeiteinheit gehende Electricitätsmenge. Wenn ein unverzweigter Leiter an verschiedenen Stellen verschiedene Querschnitte hat, so geht zwar immer noch in der Zeiteinheit durch einen jeden Querschnitt dieselbe Electricitätsmenge, da aber, wo der Querschnitt kleiner ist, ist der Strom in demselben Verhältniss dichter. Er wird also in einem dünnen Theil einer Drahtleitung dichter sein, als in einem dicken, ganz ohne Rücksicht auf die Leitungsfähigkeit der Drähte. Wenn aber der Strom verzweigt wird zwischen Drähten von verschiedenem Widerstand, so muss wohl beachtet werden, ob der Widerstand ein anderer geworden ist wegen der verschiedenen Leitungsfähigkeit der Drähte oder aus anderen Gründen. Behalten wir das gewählte Beispiel unseres zweigespaltenen Stromes bei. Die Leiter r_1 und r_2 sollen aus demselben Metall bestehen und gleich lang sein; r_2 hat den Widerstand $\frac{1}{2}$ S.E., r_1 aber 1. S.E., weil sein Querschnitt nur halb so gross ist wie der von r_2 , z. B. sei der Querschnitt von $r_1 = 1 \square$ mm, der von $r_2 = 2 \square$ mm. Nun wissen wir, dass die Stromstärke in $r_1 = \frac{1}{3}$, die in r_2 aber $= \frac{2}{3}$ der gesammten Stromstärke war. Dividiren wir diese beiden Stromstärken durch die zugehörigen Querschnitte 1 und 2, so kommt beidemal $\frac{1}{3}$ heraus, d. h. die Dichtigkeit ist in beiden Drähten ganz dieselbe. Hätten aber beide Drähte zwar dieselbe Länge und denselben Querschnitt, der erste bestehe aber aus Neusilber, der zweite aus Platin, so verhalten sich ihre Widerstände wie 4:8, d. h. ebenfalls wie 1:2, die Stromstärken in ihnen sind also auch $= \frac{1}{3}$ und $\frac{2}{3}$; wenn aber diese beiden Zahlen durch denselben Querschnitt dividirt werden, so kommen immer zwei Zahlen heraus, die sich wie 1:2 verhalten, die Dichtigkeiten in den beiden Drähten sind also nicht gleich, sondern die in der schlechter leitenden Substanz ist die kleinere, die im guten Leiter die grössere. Wenn wir annehmen dürfen, dass die specifische Leitungsfähigkeit der Muskel- und der Nervensubstanz nahezu die gleiche ist, so folgt daraus, dass der Stromzweig, welcher

durch den Nerven geht, unter sonst gleichen Umständen keineswegs eine grössere *Stromdichte* enthält, als der durch den Muskel gehende, nur seine *Stromstärke* ist grösser. Läuft aber ein Strom *hintereinander* durch Nerv und Muskel, so ist allerdings die Dichtigkeit in dem dünneren Nerven die grössere, die Stromstärke aber ist in Nerv und Muskel die gleiche.

Die Stromverzweigung bietet uns ein bequemes Mittel, die Stärke desjenigen Stromes, welcher durch einen gegebenen Leiter gehen soll, beliebig abzustufen. Ich brauche nur eine Zweigleitung herzustellen, deren einer Zweig durch den gegebenen Leiter, etwa den Draht r_1 gebildet wird, der zweite aber, r_2 , durch einen Rheostaten. Je mehr Widerstand der Rheostat bietet, ein desto grösserer Stromtheil geht durch r_1 und umgekehrt. Eine derartige Abstufung ist oft der durch Einschalten von mehr oder weniger Elementen weit vorzuziehen, allerdings aber darf man nicht vergessen, dass durch Hinzufügung einer Zweigleitung immer die Gesamtstromstärke vergrössert und also die Batterie mehr angegriffen wird. Ich lasse hier den Strom eines Stöhrer'schen Elementes zum Theil durch den Rheostaten, zum Theil durch das Galvanometer gehen, und während bei dem Versuche, den ich in meinem vorigen Vortrage anstellte, durch das Herausziehen der Rheostatenstöpsel die Ablenkung verringert wurde, wächst sie jetzt durch das Herausziehen der Stöpsel im benachbarten Zweige.

Von den Gesetzen der Stromverzweigung wollen wir zwei wichtige Anwendungen machen, nämlich die zur Messung von Widerständen und zur Vergleichung electromotorischer Kräfte. Wenn der von einem Ele-

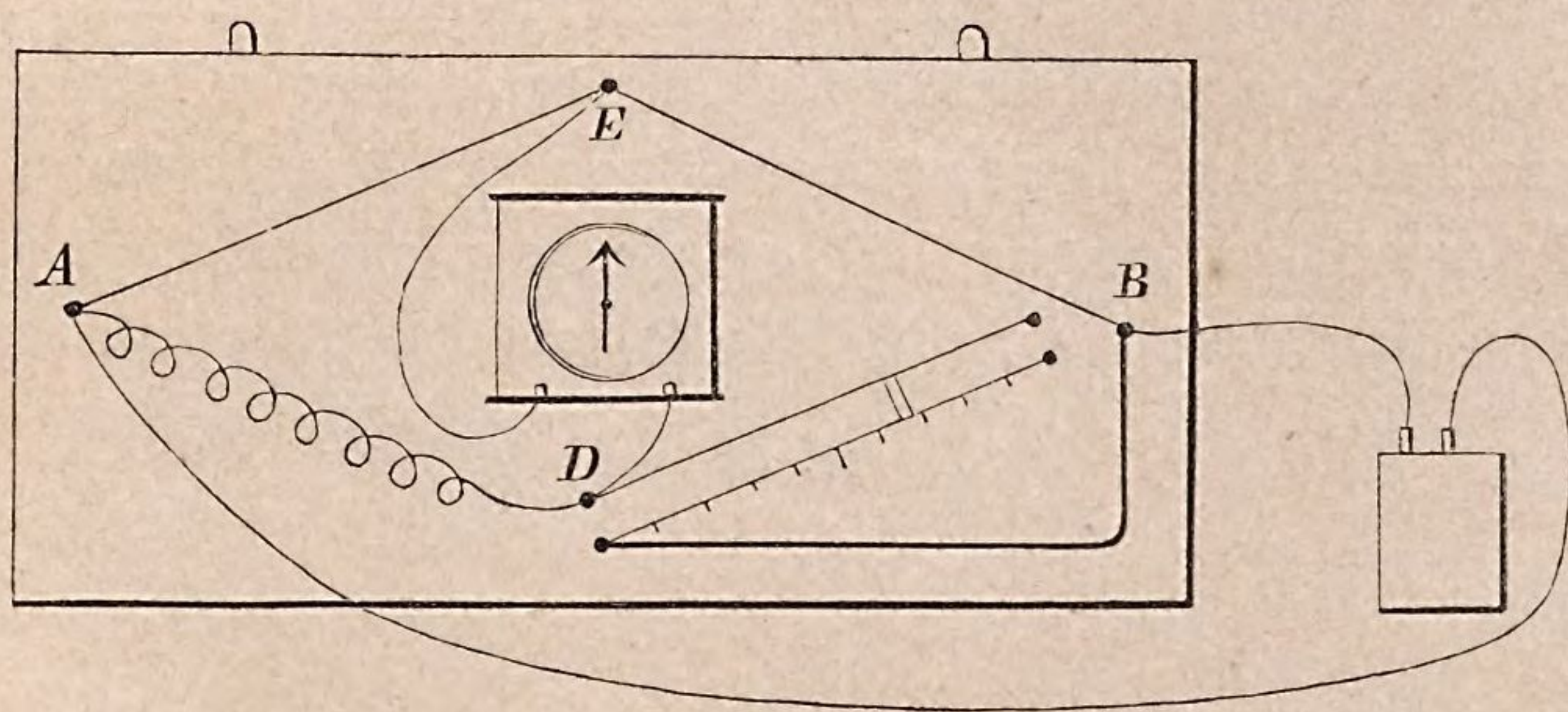
Fig. 25.



mente ausgehende Strom bei A in die beiden Zweige AEB und ADB gespalten wird, zwei Punkte E und D aber wieder durch eine Leitung mit einander verbunden werden, so entsteht eine Wheatstone'sche oder

Kirchhoff'sche Brücke. Im allgemeinen wird ein in die Leitung ED eingeschaltetes Galvanometer den Durchgang eines Stromes anzeigen, weil von A aus sowohl auf dem Wege ADEB als auf dem AEDB Electricität durch ED fließt. Verhalten sich aber die Widerstände $AE:EB = AD:DB$, so geht auf dem einen Wege gerade soviel Electricität, wie auf dem andern, und da beide im Galvanometer entgegengesetzte Richtung haben, so bleibt die Nadel in Ruhe. Wenn ich z. B. den Widerstand AE von vorn herein gleich EB, den Widerstand DB aber durch Einschaltung eines Rheostaten veränderlich mache und AD durch einen beliebigen Draht ersetze, dessen Widerstand ich messen möchte, so muss ich dem Rheostaten wieder denselben Widerstand geben, welchen AD hat, um das Galvanometer auf Null zu bringen. Hierin liegt die Methode der Widerstandsmessung, welche wir die *Brückenmethode* nennen. Zu ihrer Ausführung dienen die Widerstandsbrücken, in denen die Widerstände AE und EB sowohl, als auch DB beliebig durch Stöpsel- oder Schlittenrheostaten verändert werden können. Da das Experimentiren mit denselben auf dem Tische nur wenig instructiv ist, so habe ich sie nur zur Ansicht aufgestellt; zur Ausführung von Messungen aber bediene ich mich eines Modelles.

Fig. 26.

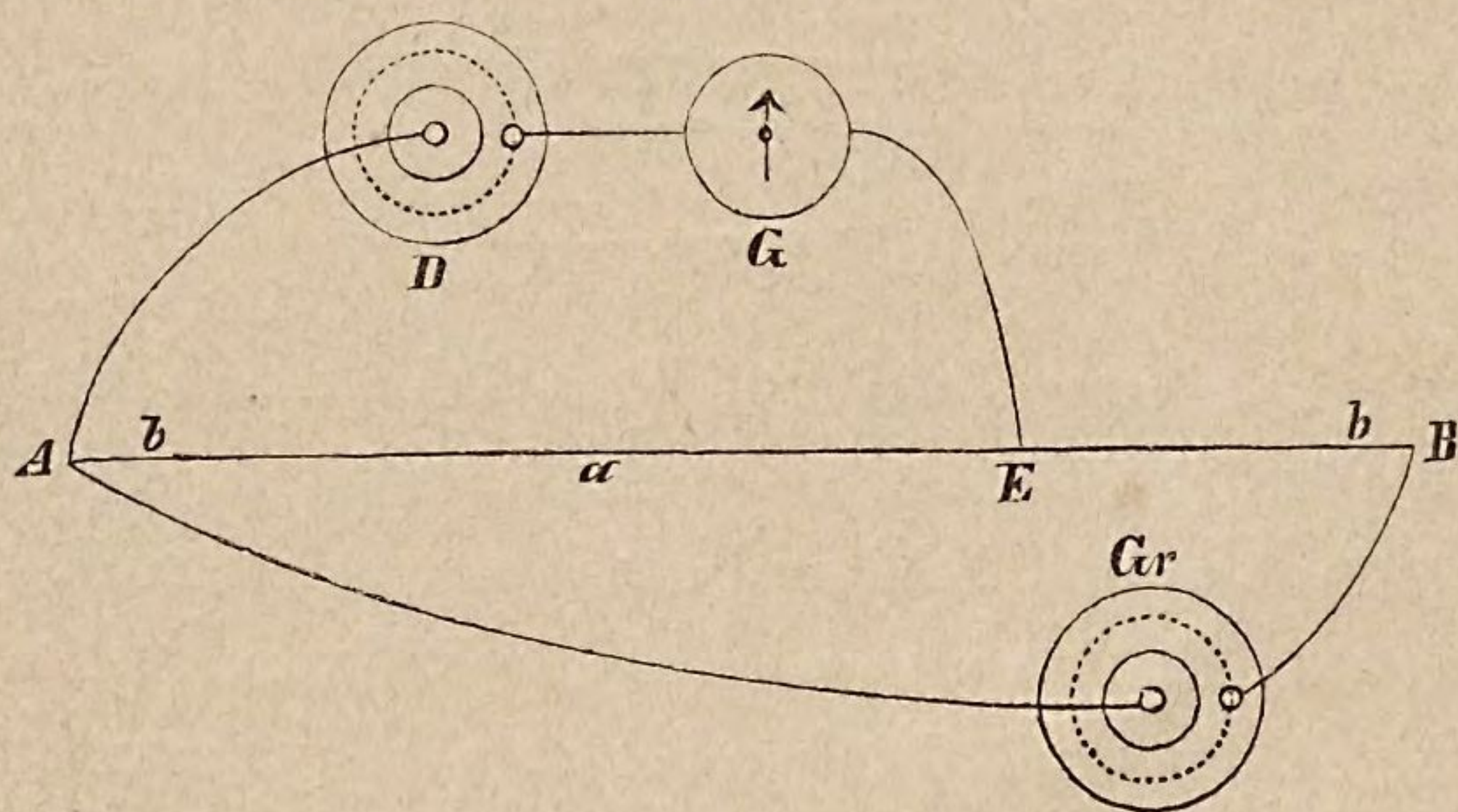


Ich hänge hier eine Tafel auf, in welche unser kleines Verticalgalvanometer eingefügt ist, dessen Drahtenden mit E und D verbunden sind. Die Drähte AE und EB sind zwei gleich lange Neusilberdrähte, DB wird dargestellt durch einen dicken Kupferdraht, dessen Widerstand ich vernachlässigen darf und durch zwei parallel gespannte Platindrähte, die durch einen Quecksilberschlitten mit einander verbunden sind. Den Strom erzeugt ein Groveelement. Ich schalte zwischen A und D einen beliebigen Neusilberdraht ein, die Galvanometernadel weicht nach einer

Seite ab, ich verschiebe den Schlitten, sie weicht nach der andern Seite ab. In einer Zwischenstellung bringe ich die Nadel auf Null; der Widerstand des fraglichen Neusilberdrahtes ist dann gleich dem des abgegrenzten Stückes der Rheostatendrähte, also in unserem Falle, wenn der Widerstand der beiden ganzen Rheostatendrähte $= 1$ S.E. ist, gleich 0,65 S.E. Ich ersetze den Neusilberdraht durch einen 2 mm dicken, 3 Meter langen Silberdraht; jetzt darf ich den Schlitten bis ganz an den Anfang der Rheostatentheilung schieben, um die Galvanometernadel ins Gleichgewicht zu bringen, d. h. ich darf den Widerstand dieses dicken und sehr gut leitenden Körpers trotz seiner Länge noch immer ganz vernachlässigen, und endlich schalte ich die Säule von Zinkvitriollösung, welche durch zwei amalgamirte Zinkklötze abgegrenzt ist, zwischen A und D ein; wenn ich nun auch den Schlitten ganz an das Ende der Rheostatendrähte schiebe, so muss ich doch die Zinkklötze bis fast zur Berührung einander nähern, um den Widerstand der kurzen, zwischen ihnen noch vorhandenen Flüssigkeitssäule noch durch den des ganzen Rheostaten ausdrücken zu können.

Für die Ausführung der zweiten Messmethode, der *Compensationsmethode*, bleiben wir bei der Annahme stehen, dass als Einheit der electromotorischen Kraft die Kraft eines Daniellelementes betrachtet werden soll. Alle Compensationsmethoden beruhen darauf, dass man durch ein Galvanometer den ungetheilten Strom einer schwächeren und einen Stromzweig von einer stärkeren Stromquelle gehen lässt, bis die Ablenkung des Galvanometers Null geworden ist; ich werde Ihnen die einfachste Form derselben, wie sie du Bois-Reymond gegeben hat, vorführen.

Fig. 27.



Die stärkere Stromquelle sei Gr (ein Grove), die schwächere D (ein Daniell). Ein gespannter Draht AB, der Compensatordraht, ist

in seiner ganzen Länge in den Strom von Gr eingeschaltet. Der Widerstand von AB sei $= b$, der des Elementes Gr und seiner Zuleitungsdrähte $= w$. Die Poldrähte von D werden einerseits an das Galvanometer G, andererseits an A befestigt, und zwar so, dass die beiden mit A verbundenen Pole von Gr und D gleichnamig, z. B. beide positiv sind, während das zweite Ende des Galvanometerdrahts auf AB hin- und herbewegt werden kann. Es schneidet dabei von AB ein Stück AE ab, dessen Widerstand a heissen mag. Es geht nun der ganze Strom von D durch das Galvanometer und den Abschnitt AE des Compensator- drahtes, dagegen geht vom Strome von Gr ein Zweig durch AE, der andre durch das Galvanometer. Ist die Lage von E richtig so gefunden, dass die Galvanometernadel in Ruhe bleibt, so verhält sich

$$\text{Gr} : D = b + w : a,$$

wir würden also die Kraft von Gr durch die von D ausdrücken können, wenn w bekannt wäre. Das wird aber sogar unnöthig, wenn wir nicht verlangen, die Kraft des compensirten Elementes D mit der des compensirenden zu vergleichen, sondern uns begnügen, zwei verschiedene Elemente, deren eines das Einheitselement D ist, einzeln mit Gr, dem compensirenden, zu vergleichen und dadurch das Verhältniss der beiden compensirten unter einander zu finden. Ein solches zweites Element sei x ; sein negativer Pol wird mit dem negativen von D verbunden. Um nun die electromotorischen Kräfte D und x mit einander zu vergleichen, compensiren wir Gr durch D, lösen dann die Verbindung AD und stellen dafür die Ax her. Eine jetzt ausgeführte Compensation wird eine andere Lage von E ergeben, etwa in E_1 , so dass der Widerstand von $AE_1 = a_1$ ist. Während wir nun für das Verhältniss der Kräfte eines Grove und eines Daniell gefunden hatten

$$\text{Gr} : D = b + w : a,$$

haben wir jetzt

$$\text{Gr} : x = b + w : a_1.$$

Wir erhalten deshalb das äusserst einfache Verhältniss

$$\frac{x}{D} = \frac{a_1}{a}$$

oder, wenn wir wieder die electromotorische Kraft eines Daniellelementes als Einheit nehmen,

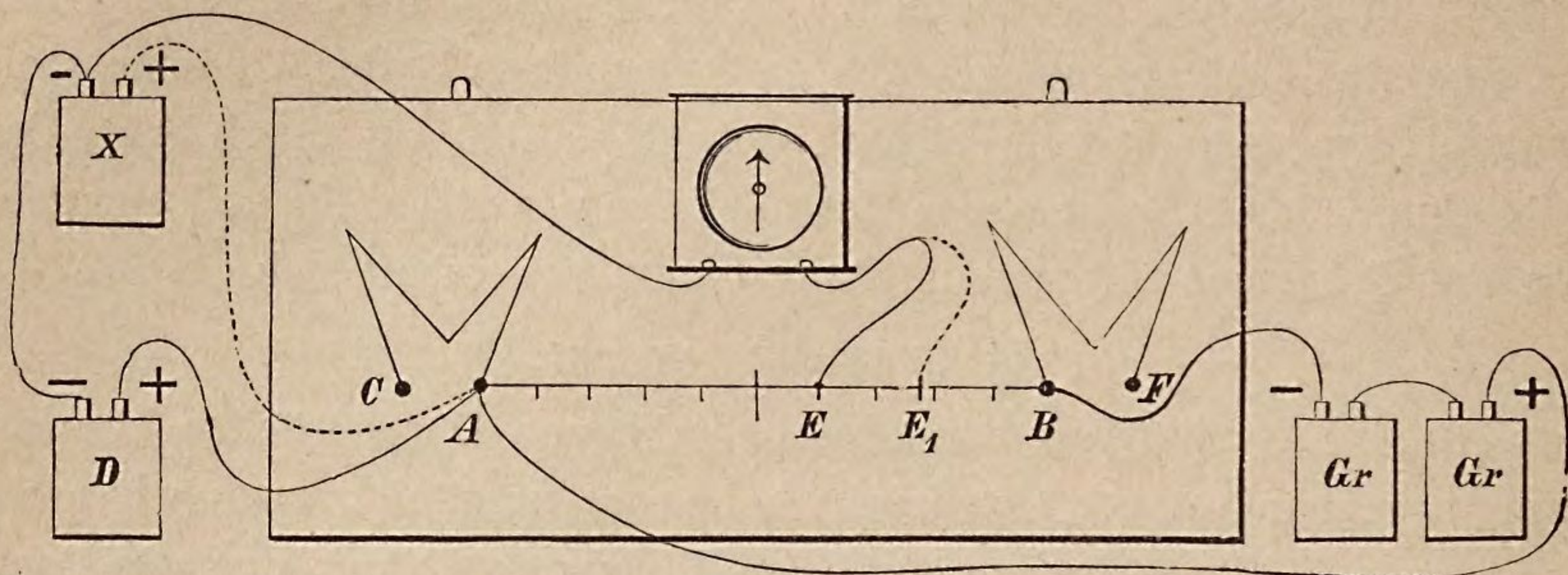
$$x = \frac{a_1}{a}.$$

Wir messen also eine beliebige electromotorische Kraft durch die des Daniellelementes.

Ich zeige Ihnen auch diese Messmethode an einem Modell.

Ich habe wieder das Verticalgalvanometer in eine Tafel eingelassen, auf welcher ein Neusilberdraht AB ausgespannt ist. Das com-

Fig. 28.



pensirende Element Gr ist diesmal durch zwei Groveelemente ersetzt, D ist ein Daniell- und x ein Leclanchéelement. Ich stelle die Verbindungen ganz in der beschriebenen Weise her und compensire zuerst das Daniellelement. Das abgeschnittene Stück des Compensatordrahtes beträgt 0,6 der ganzen Drahtlänge; dann compensire ich ebenso das Leclanchéelement x, das abgeschnittene Stück AE₁ des Drahtes ist = 0,78; also ist die Kraft des Leclanchéelementes in der Einheit des Daniellelementes gemessen $= \frac{0,78}{0,6}$ oder = 1,3.

Zur praktischen Ausführung solcher Vergleiche electromotorischer Kräfte dienen die *Stromcompensatoren*. Ihr wesentlichster Theil, der Compensatordraht, kann auf einem Brette gerade ausgestreckt oder um die Peripherie einer kreisrunden Schieferscheibe gelegt werden. Im ersteren Falle wird ein mit dem Galvanometer verbundener Schlitten, im zweiten eine durch einen radialen Arm mit dem Centrum der Scheibe und dadurch mit dem Galvanometer verbundene Rolle auf dem Drahte hingeführt. Das Stück, welches Schlitten oder Rolle in der Compensationslage von der ganzen Drahtlänge abschneiden, wird in beiden Fällen an einer Theilung abgelesen.

Endlich verhilft uns aber die Compensationsmethode auch zur Messung *innerer Batteriewiderstände*. Wenn uns die Compensation der

Batterie Gr durch das Einheitselement D (oder durch irgend ein anderes) das Verhältniss

$$\text{Gr} : \text{D} = b + w : a$$

ergeben hatte, so fehlte uns immer noch der Werth des inneren Batteriewiderstandes w . An unserem Modell befindet sich aber noch ein zweiter, hier zickzackförmig gespannter Draht KA von dem beliebigen Widerstande d . Befestige ich nun die Klemmschraube, welche die beiden Leitungsdrähte von den positiven Polen der Stromquellen Gr und D trägt, an K statt an A, so verwandelt sich der Widerstand des Compensatordrahtes aus b in $b + d$; um die Compensation wieder herzustellen, muss ich aber den Schlitten E auf eine andere Stelle E_2 bringen, so dass das nunmehr vom Drahte abgeschnittene Stück AE_2 den Widerstand a_2 hat. Dann bekomme ich die neue Proportion

$$\text{Gr} : \text{D} = b + d + w : d + a_2$$

und aus dieser und der früheren ist es leicht, den Batteriewiderstand w zu berechnen. Ein dritter Widerstandsdraht BF, welchen Sie auch noch zickzackförmig auf der Tafel ausgespannt finden, kommt nur dann in Anwendung, wenn eine der Compensationen zwischen den angegebenen Grenzen nicht zu erreichen ist. Durch seine Benutzung kann man den Widerstand des ganzen Compensatordrahtes b vergrössern, ohne gleichzeitig die Länge des abgeschnittenen Stückes a dabei zu ändern.

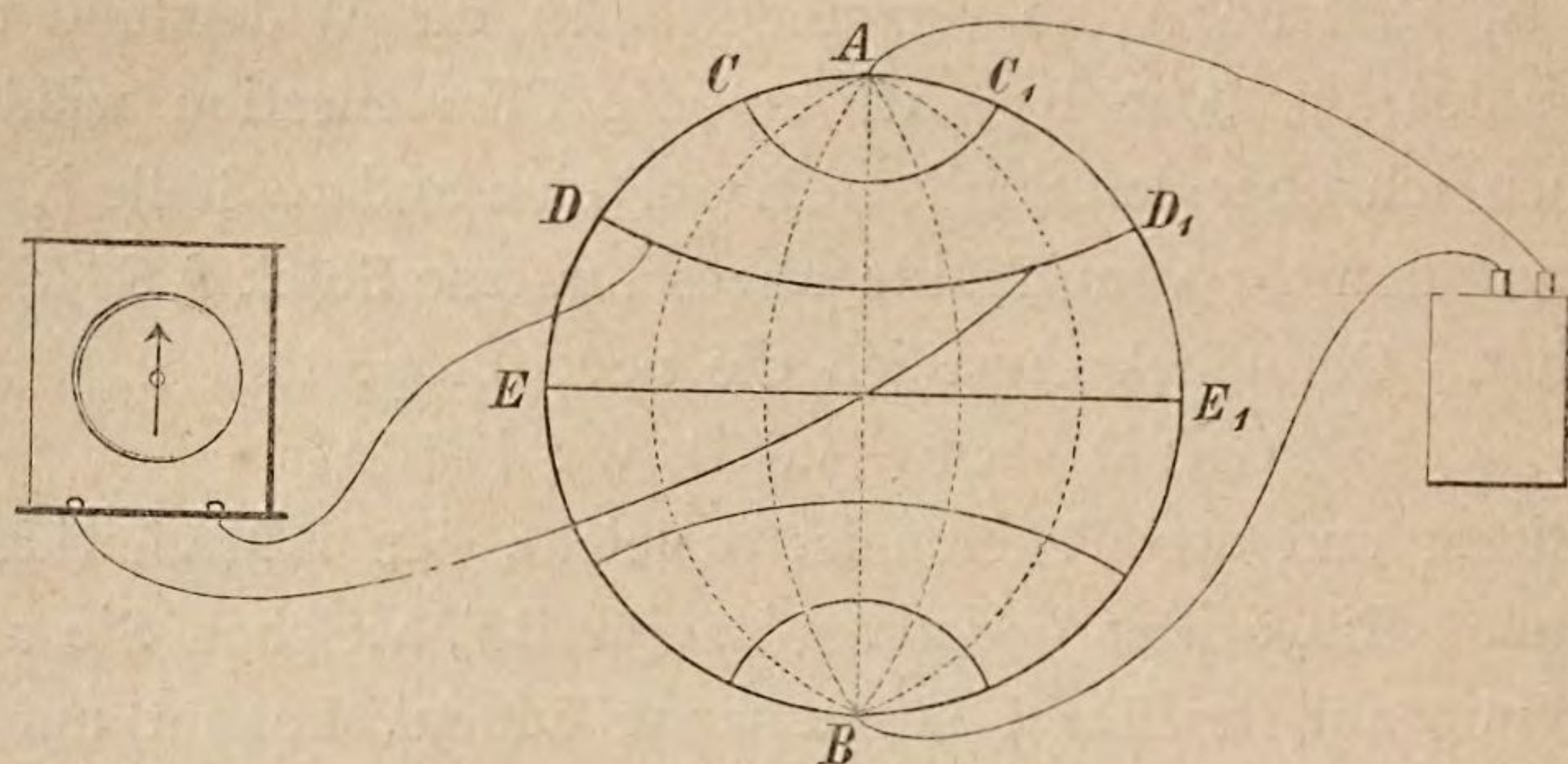
Auch zur Ausführung dieser Widerstandsmessung können wir uns eines jeden Compensators bedienen, wenn wir ihm am Anfange und Ende des Compensatordrahtes je einen Rheostaten hinzufügen, welcher nach Bedürfniss an die Stelle der Zickzackdrähte AK oder BF zu treten hat. Im *Universalcompensator* habe ich solche Hilfswiderstände von vorn herein angebracht.

Hiermit sind uns also die Mittel gegeben, um electromotorische Kräfte, innere und äussere Widerstände zu messen, während wir für die Stromstärken noch immer keine besondere Einheit eingeführt haben.

Die Lehre von den Zweigströmen führt mich noch auf eine Betrachtung, durch welche ich versuchen will, Ihnen ein Bild zu verschaffen von dem Leitungsvorgange, welcher in nicht einfach lineären oder prismatischen, sondern in flächenförmig oder körperlich beliebig ausgebreiteten Leitern stattfindet. Ich gehe von dem einfachen Falle aus, dass der Leiter aus einer dünnen kreisrunden Metallscheibe besteht, und der Strom an den beiden Endpunkten A und B eines Durchmessers in die Scheibe eingeleitet wird. Vom Punkte grösster Spannung, A, breitet

sich die Electricität nach allen Richtungen hin aus und wird im Allgemeinen an den verschiedenen Punkten der Scheibe verschiedene Spannung haben. Aber in der Scheibe können wir Linien finden, in denen alle Punkte unter sich gleiche Spannung haben; solche Linien gleicher Spannung sind Kreise, deren Mittelpunkte sämmtlich in AB liegen, z. B. CC_1 , DD_1 , EE_1 . Ich habe eine kreisförmige Ebonitplatte mit Stanniol

Fig. 29.



beklebt und solche Linien gleicher Spannung darauf gezeichnet, den Strom lasse ich durch A ein- und durch B austreten. Lege ich ein Drahtende des Galvanometers auf eine dieser Linien und folge mit dem anderen Drahtende der Linie, so zeigt das Galvanometer keinen Strom an. Berühre ich aber mit dem zweiten Drahtende einen über oder unter der Linie liegenden Punkt der Scheibe, so erhalte ich eine Ablenkung der Nadel in dem einen oder anderen Sinne. Durch die ganze Scheibe bewegt sich nun die Electricität von den Punkten grösserer zu denen geringerer Spannung und zwar so, dass jedes electrische Theilchen sich von einer Spannungslinie zur nächsten auf dem kürzesten Wege verschiebt, d. h. auf einem Wege, der senkrecht auf beiden steht. Hierdurch entsteht eine unendliche Zahl von *Stromfäden*, welche A mit B verbinden, deren äusserster die Peripherie der Scheibe, deren innerster der Durchmesser AB ist; alle diese Fäden durchschneiden die Spannungslinien senkrecht. Setze ich einen Galvanometerdraht auf irgend einen Punkt eines solchen Stromfadens und folge diesem mit dem andern Drahtende in der Richtung von A nach B zu, so erhalte ich immer Ströme in derselben Richtung, die stärksten auf AB selbst, weil dieser Faden der kürzeste ist und also den geringsten Widerstand bietet.

Hätte die leitende Scheibe eine andere Gestalt, so würden sich

auch die Gestalt und Lage der Stromfäden und der Linien gleicher Spannung ändern, immer würden aber die einen die andern senkrecht durchschneiden.

Denken Sie sich nun unsere Kreisscheibe um die Linie AB her-umgedreht, so entsteht eine leitende Kugel. Die Linien gleicher Spannung werden aus Kreisen zu Kugelflächen, in denen wieder alle Punkte gleiche Spannung haben; solche Flächen heissen *Niveauflächen*. In jedem körperlichen Leiter sind um die Einströmungspunkte die Niveauflächen geordnet und wir finden die Stromfäden, wenn wir von jedem Punkte einer jeden Niveaufläche Senkrechte auf die nächste Niveaufläche gezogen denken. Alle diese Fäden bilden gewissermassen Bündel von Zweigleitungen, auf welche die Gesetze von den Zweigströmen immer wieder anwendbar sind. Es gehört zu den sonderbarsten Verirrungen, anzunehmen, dass im menschlichen Körper diese Gesetze keine Geltung haben sollen; auch dort findet dasselbe statt, wie im unbelebten Leiter, und der Begriff der *Localisirung* der Wirkung eines Stromes wird gerade aus dem Gesagten verständlich. Wenn die Einströmungspunkte nahe an einander liegen, so werden für die Wirkung des Stromes die Strecken geringsten Widerstandes, d. h. unter sonst gleichen Umständen die in der geraden Verbindungslinie zwischen beiden liegenden, am meisten in Betracht kommen. Liegen in dieser Linie oder auf einem benachbarten Zweige Theile von hervorragender Reizbarkeit, so wird die Localisirung in noch höherem Maasse zu Tage treten.

SECHSTER VORTRAG.

Meine Herren!

Wir haben bei der Erregung der Contactelectricität unterschieden zwischen dem Verhalten der Leiter erster und zweiter Klasse. Beide lernten wir als Erreger kennen, aber die ersteren folgten dem Gesetz der Spannungsreihe, die letzteren nicht. In Bezug auf ihre Leitungsfähigkeit lernten wir die Leiter zweiter Klasse als viel schlechtere Leiter kennen, als die erster Klasse, übrigens aber haben wir sie wie diese behandelt, z. B. den Widerstand einer Zinkvitriollösung durch dieselbe Methode gemessen, wie den eines Metalldrahtes. Jetzt aber wollen wir den Vorgang der Leitung in den Flüssigkeiten, der ein wesentlich anderer ist, wie der in den Metallen, näher betrachten.

Eine Flüssigkeit kann ein Leiter erster Klasse sein, wie das Quecksilber; ist sie das nicht, so kann sie nur dann leiten, wenn sie chemisch zersetzt wird. Brom kann als Element nicht zersetzt werden und da es kein Leiter erster Klasse ist, so leitet es überhaupt nicht. Reines Wasser wird vom Strome nicht zersetzt, es leitet ihn auch nicht. Deshalb sind die Begriffe »Leiter zweiter Klasse« und *Electrolyt* gleichbedeutend. Wenn wir die *Electrolyse*, den chemischen Vorgang in einem Leiter zweiter Klasse, beobachten wollen, so tauchen wir in denselben zwei mit den beiden Säulenpolen verbundene Metallplatten, gewöhnlich von dem Metalle, das chemischen Angriffen am wenigsten ausgesetzt ist, Platin. Die Oberflächen dieser Platten, in welchen sie an die Flüssigkeit grenzen, durch welche also der Strom aus dem Metall in die Flüssigkeit und umgekehrt tritt, hat Faraday die *Electroden* genannt; heut zu Tage pflegen wir nicht nur diese mathematischen Flächen, sondern die ganzen Platten,

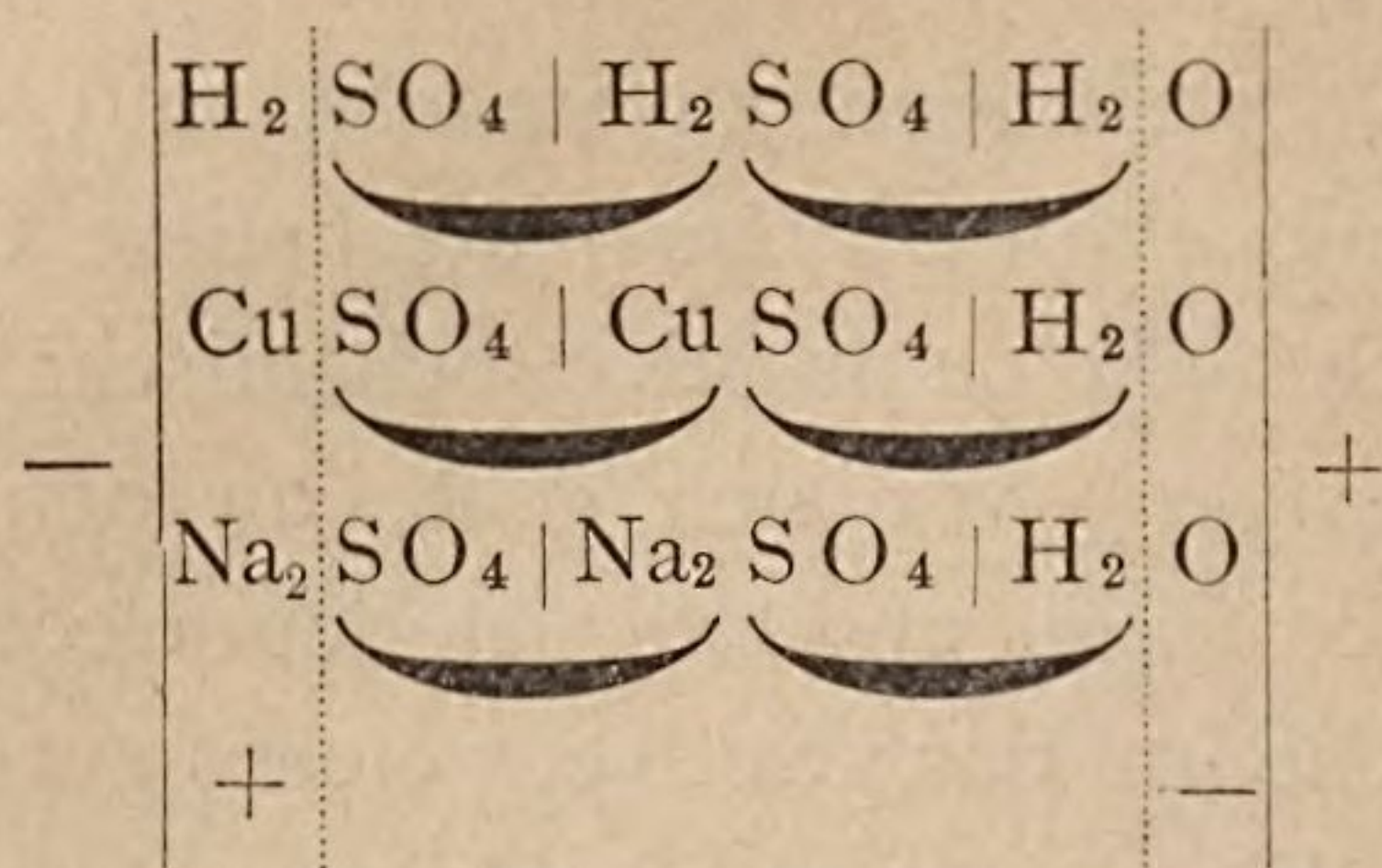
materiell genommen, Electroden zu nennen und zwar die mit dem negativen Pol verbundene die *Kathode*, die andere die *Anode*. Die Bestandtheile, welche sich in Folge des electrochemischen Processes, welcher nunmehr in der Flüssigkeit vor sich geht, an den beiden Electroden ausscheiden, heissen die *Ionen*, und zwar ist, dem electrischen Anziehungsgesetz entsprechend, das Ion das positive, welches zur negativen Electrode geht und umgekehrt. Wir können uns im Allgemeinen die electrolytischen Vorgänge nach der alten Grotthuess'schen Theorie so denken, dass ein Molecül des Electrolyten, welches die Kathode unmittelbar berührt, unter der Einwirkung der an derselben auftretenden Electricität sein positives Ion abgibt, sich aber vom nächsten Molecül her dasselbe wieder aneignet und dadurch das negative dieses zweiten Molecüls freigibt, welches sich seinerseits wieder durch das nächste negative Ion ergänzt, bis schliesslich an der Anode das letzte negative Ion übrig bleibt und ebenfalls ausscheidet.

Denken wir uns zuerst einen Electrolyt, welcher nur aus zwei Elementen besteht, z. B. Chlorsilber. Wird dasselbe in der Hitze geschmolzen, und wird dann ein Strom durch zwei Eisendrähte in die geschmolzene Masse geleitet, so scheidet sich am negativen Poldraht Silber, am positiven Chlor aus; das Chlorsilber wird einfach in seine beiden Bestandtheile, welche hier als Ionen erscheinen, zerlegt und der dabei stattfindende Vorgang lässt sich so schreiben:



Wir denken uns eine Reihe von Chlorsilbermolecülen zwischen die negative und positive Electrode gelagert; an der ersten scheidet sich Silber aus, welches deshalb das positive Ion genannt wird, und nachdem durch den vorher beschriebenen Vorgang das übrigbleibende Chloratom sich durch das nächste Silberatom wieder zu Chlorsilber ergänzt hat, bleibt an der positiven Electrode Chlor übrig, welches daher das negative Ion heisst; innerhalb der Flüssigkeit aber kann nirgend eine Ausscheidung stattfinden.

Gewöhnlich sind aber unsere Electrolyte in wässrigen Lösungen enthalten; ich will einige solche Lösungen miteinander betrachten, nämlich die der Schwefelsäure, des Kupfervitriols und des Glaubersalzes. Unser Schema müssen wir dann so schreiben, dass Molecüle der gelösten Stoffe mit Wassermolecülen abwechselnd zwischen beide Electroden gelagert sind, also etwa so:



In den drei Fällen ist der Vorgang zunächst vollkommen der gleiche: An der negativen Electrode scheiden sich aus: Wasserstoff, Kupfer, Natrium; es bilden sich neue Molecüle von Schwefelsäure, Kupfersulphat und Natriumsulphat, dann Molecüle von Schwefelsäure und endlich tritt an der positiven Electrode in allen Fällen Sauerstoff auf. Der erste der betrachteten Fälle wird gewöhnlich als die Electrolyse des Wassers angesehen, er entspricht aber vollständig der Electrolyse von Salzlösungen; in allen drei betrachteten Fällen ist der vom gelösten Molecül nach Ausscheiden des positiven Ions übrig bleibende Bestandtheil das Säureradical SO_4 , und in allen drei Fällen wird durch die Einwirkung des SO_4 auf das Lösungswasser O in Freiheit gesetzt. Wir sehen an diesem Beispiel, wie eine Flüssigkeit, welche nicht leitet, wie reines Wasser, auch nicht zersetzt wird, und dass nicht H_2O , sondern H_2SO_4 der Electrolyt ist. Und so können wir als Hauptunterschied zwischen den Leitern erster und zweiter Klasse den aufstellen, dass die Leiter erster Klasse eine eigenthümliche Leitungsfähigkeit besitzen, d. h. dass sich in ihnen die Electricität von den Punkten höherer Spannung zu denen niederer Spannung bewegt, ohne das Material des Leiters an der Bewegung selbst theilnehmen zu lassen, während die Leiter zweiter Klasse nur dadurch leiten, dass sie zersetzt werden. Das von manchen Physikern angenommene gleichzeitige Vorhandensein beider Leitungsarten in den flüssigen Körpern ist noch nicht nachgewiesen.

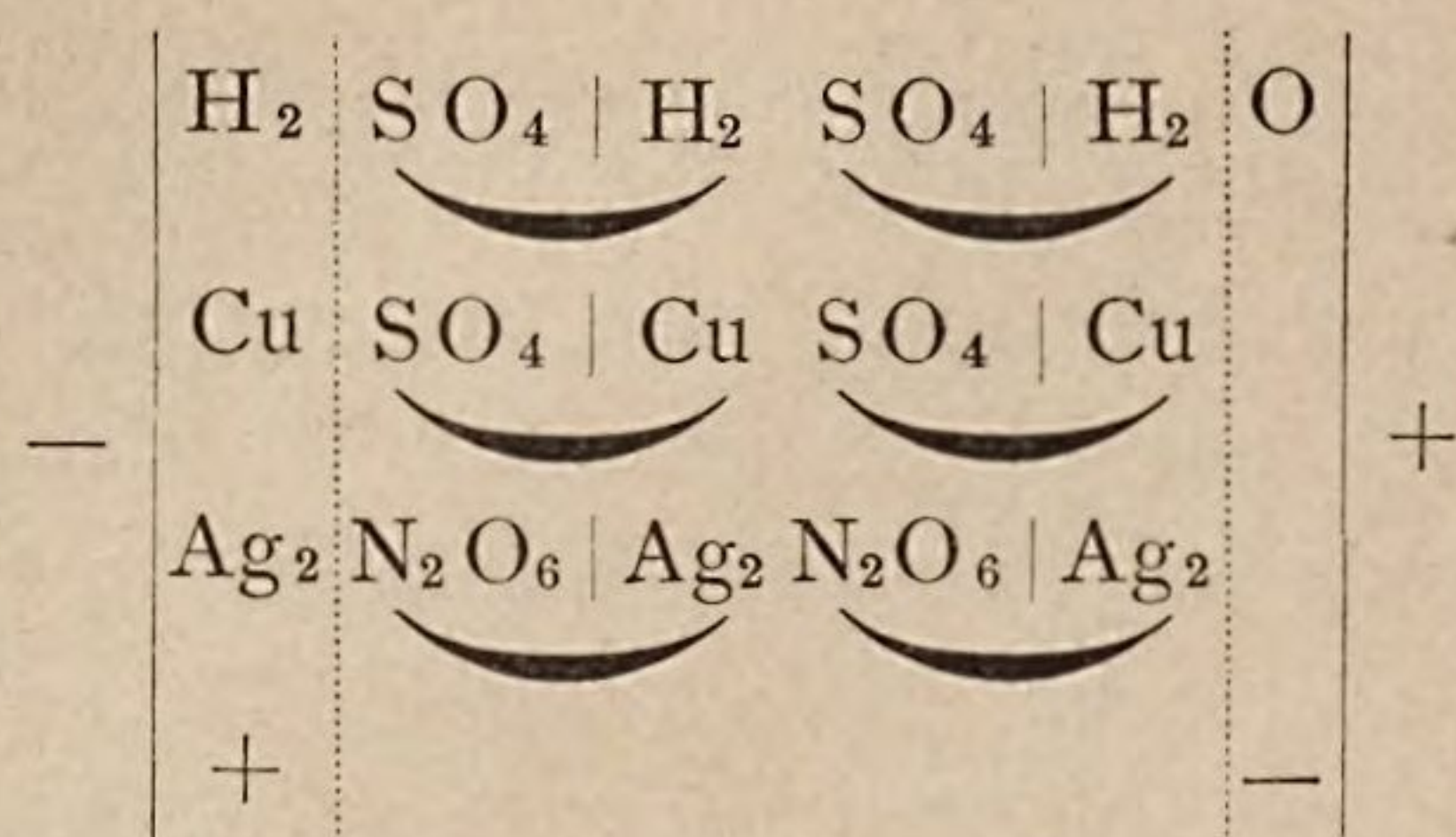
Aus diesen verschiedenen Leitungsvorgängen erklärt sich auch das verschiedene Verhalten der Leiter erster und zweiter Klasse beim Erwärmen. Das Leitungsvermögen der Leiter zweiter Klasse nimmt bei höherer Temperatur zu, weil die Wärme die Beweglichkeit ihrer Molecüle erhöht; das der Leiter erster Klasse nimmt dagegen ab, weil ihre Molecüle durch die Erwärmung nur weiter von einander entfernt werden.

Betrachten wir die Resultate der drei besprochenen Electrolysen: Bei der ersten werden Wasserstoff und Sauerstoff in Gasgestalt entwickelt. Bei der Electrolyse der Kupfervitriollösung scheidet sich metallisches

Kupfer auf der Kathode ab; wir verwerthen diesen Process für die Galvanoplastik. Bei der Electrolyse des Glaubersalzes endlich tritt an der Kathode ein secundärer Process ein. Das ausgeschiedene Natrium kann in der wässrigen Lösung nicht bestehen. Die 2Na entziehen zwei benachbarten Wassermoleculen ihr Hydroxyl, bilden damit Natriumhydroxyd und lassen 2H frei werden. Hierdurch sieht es so aus, als hätte der Strom aus der Glaubersalzlösung, wie aus der verdünnten Schwefelsäure, an der Kathode Wasserstoff entwickelt, oder, wie man es früher ansah, zugleich Salz und Wasser zersetzt, während er in der verdünnten Schwefelsäure nur Wasser zersetzte, in der That aber hat die Wasserstoffentwicklung aus dem Glaubersalz eine rein chemische, nicht eine electrochemische Ursache. Haben wir die Lösung mit einer blauen Pflanzenfarbe, etwa Blaukrautabsud, gefärbt, so zeigt sich das Auftreten der freien Säure an der Anode durch die rothe, die des freien Hydroxyds durch die grüne Färbung des Farbstoffes.

Was nun die Menge der bei den verschiedenen Electrolysen abgeschiedenen Stoffe betrifft, so wollen wir denselben Strom hinter einander durch mehrere Electrolyte gehen lassen, von denen wir wenigstens den einen abgeschiedenen Bestandtheil leicht und mit Sicherheit quantitativ bestimmen können. Es sollen sein: verdünnte Schwefelsäure, Kupfersulphatlösung, Silbernitratlösung. Die beiden aus der verdünnten Schwefelsäure ausgeschiedenen Gase können wir gesondert oder zu Knallgas gemischt in Maassröhren auffangen; wir werden im ersten Falle nahezu 2 Vol. Wasserstoff und 1 Vol. Sauerstoff finden, wenn wir die unmittelbar beobachteten Gasvolumina auf den normalen Barometerstand (760 mm) und die normale Temperatur (0°) reduciren. Die vollkommene Genauigkeit dieses Verhältnisses wird durch die verschiedene Löslichkeit beider Gase und durch die Bildung von Ozon beeinträchtigt. Da uns das specifische Gewicht des Wasserstoffs bekannt ist, so können wir die erhaltene Wasserstoffmenge in Millegrammen ausdrücken. Das niedergeschlagene Kupfer und Silber können wir, nachdem beide abgewaschen und getrocknet sind, wägen. Ich zeige Ihnen sowohl die Gasentwicklung in sogenannten Wasserzersetzungsgapparaten, indem ich in dem einen die Gase gesondert ausströmen lasse, und den Wasserstoff durch seine Verbrennbarkeit, den Sauerstoff durch das in ihm auflebende Brennen einer glimmenden Kohle kenntlich mache, als auch die Abscheidung der beiden genannten Metalle. Das abgelagerte Kupfer bildet dabei einen cohärenten Ueberzug, das Silber einen krystallinischen Beschlag auf der Platinplatte,

welche ich in beiden Fällen als Kathode gebraucht habe. Als Anode habe ich in der Kupfersulphatlösung Kupfer, in der Silbernitratlösung Silber angewandt; hierdurch wird das Ausscheiden der freien Säure an der Anode vermieden, und die Lösung immer auf ihrer alten Concentration erhalten, denn der electrochemische Vorgang in den drei Fällen stellt sich nunmehr so dar:

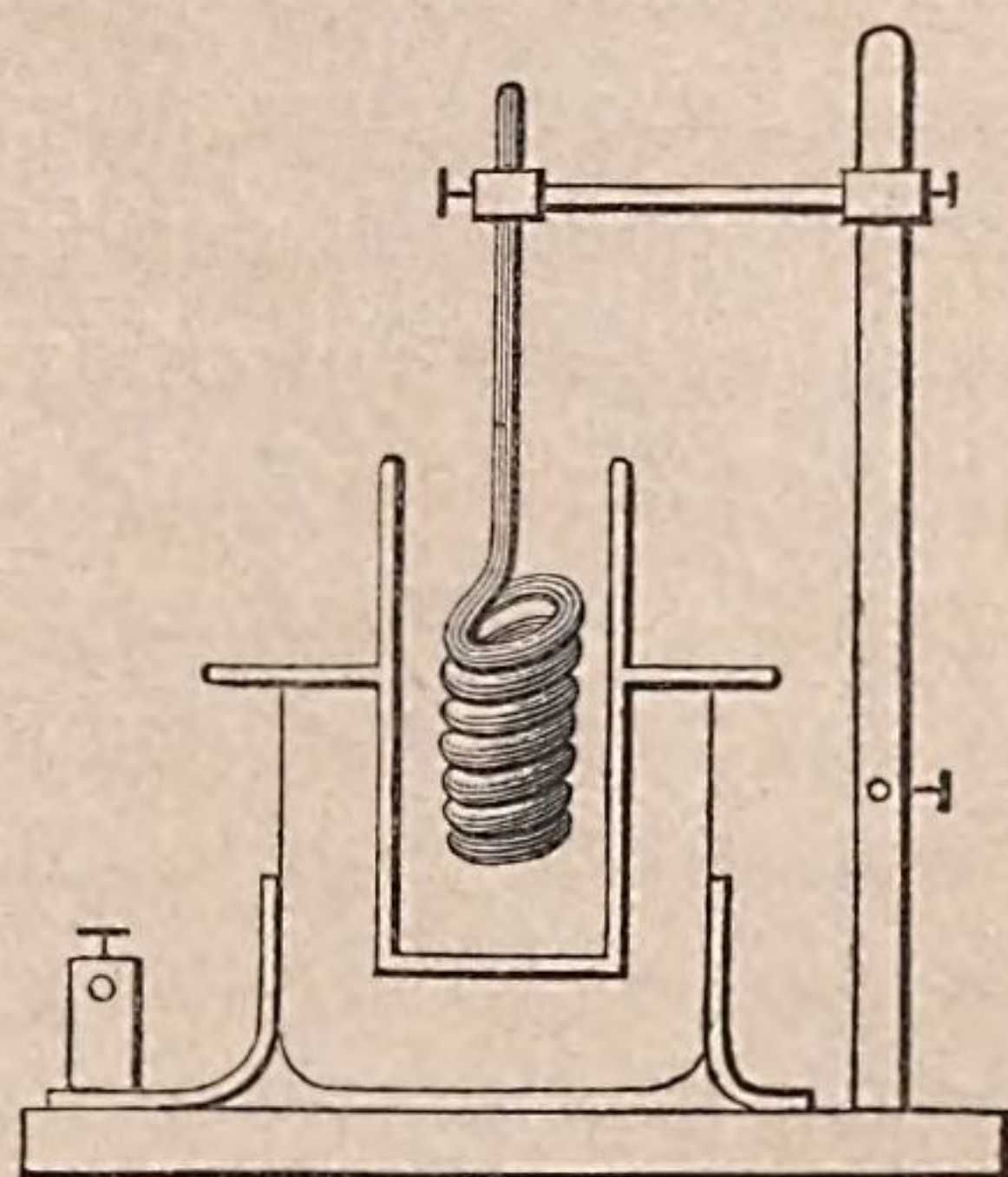


Es findet also in den beiden letzten Lösungen gar keine Sauerstoffausscheidung mehr statt; die Säureradiale nehmen vielmehr ohne Weiteres Metall von der Anode auf, und dadurch löst sich immer so viel an dieser auf, als sich an der Kathode niederschlägt. Bestimmen wir aber jetzt dem Gewichte nach die Massen der drei abgeschiedenen positiven Ionen, so finden wir, dass auf jede 2 Millegramm Wasserstoff, 63,4 Millegramm Kupfer und 216 Millegramm Silber kommen. Derselbe Strom hat also in den drei verschiedenen Electrolyten in derselben Zeit gleiche Valenzen gelöst, er hat nämlich ausgeschieden $2 \text{ H} = 2 \cdot 1$; $1 \text{ Cu} = 63,4$; $2 \text{ Ag} = 2 \cdot 108$. Dies ist das, in die Sprache der neueren Chemie übersetzte, von Faraday aufgefundene, *electrolytische Gesetz*. Durch dieses Gesetz erhalten wir jetzt endlich eine Einheit für die Stromstärke. Wenn wir dieselbe einführen, so müssen wir dafür eine der bisher benutzten Einheiten, entweder die für die electromotorische Kraft oder die für den Widerstand fallen lassen, denn eine electromotorische Kraft wird sich dann immer als das Product aus einer Stromstärke und einem Widerstand darstellen lassen: $a = S \cdot w$. Eine Stromstärke können wir nun nach verschiedenen electrochemischen Einheiten messen, wir können definiren: Einheit der Stromstärke ist diejenige Stromstärke, welche in der Zeiteinheit einen Cubikcentimeter Wasserstoff, oder ein Millegramm Wasserstoff, oder ein Millegramm Kupfer, oder ein Millegramm Silber abscheidet. Alle diese Einheiten sind *absolute*, sie sind nicht von der Gestalt der angewandten Apparate abhängig und deshalb ist eine jede in einer solchen electrochemischen Einheit ausgedrückte Messung ohne Weiteres verständlich. Ist eine Stromstärke in Millegrammen Silber pro Secunde ausgedrückt,

so brauche ich die gefundene Zahl nur mit dem Verhältniss $63,4 : 216$ zu multipliciren, um sie in Millegrammen Kupfer und mit $2 : 216$, um sie in Millegrammen Wasserstoff auszudrücken und daraus sehen Sie, dass von allen electrochemischen Einheiten für die Stromstärke die Menge des ausgeschiedenen Silbers weitaus die vortheilhafteste ist, denn, von allen Nebenumständen abgesehen, werden die durch die Electrolyse von Silberlösung gemachten Messungen im Verhältniss $216 : 63,4$ genauer, als die an Kupferlösung, und im Verhältniss $2 : 216$ genauer, als die an verdünnter Schwefelsäure ausgeführten.

Die Zersetzungsapparate, welche zur Ausführung solcher Stromstärkemessungen eingerichtet sind, heissen *Voltameter*: Wasserstoff-, Kupfer- oder Silbervoltameter. Die Wasserstoffvoltameter sind Wasserzersetzungsgapparate mit einer Maassröhre verbunden, in welcher entweder das Wasserstoffgas oder das Knallgas in der vorher besprochenen Weise unter gleichzeitiger Beobachtung der Stromesdauer gemessen wird. Von den Metallvoltametern zeichnet sich das Silbervoltameter noch dadurch aus, dass das in ihm niedergeschlagene Silber ein edles Metall ist und sich nicht während des Trocknens oxydirt. Man setzt also in ein kleines Gestell einen Platintiegel, mit dem durch leitende Federn der negative Säulenpol verbunden ist. In diesem Tiegel hängt ein poröses Tongefäss, in welches eine Spirale von dickem Silberdraht, mit dem positiven Säulenpol verbunden, taucht. Beide Gefässe werden mit Silbernitratlösung gefüllt und es schlägt sich nun das Silber auf der inneren Tiegelfläche in Krystallen nieder. Nach Beendigung des Versuches wird der Tiegel ausgeleert, mit Wasser sorgfältig ausgespült und in der Wärme getrocknet. Seine Gewichtszunahme ist das Gewicht des niedergeschlagenen Silbers.

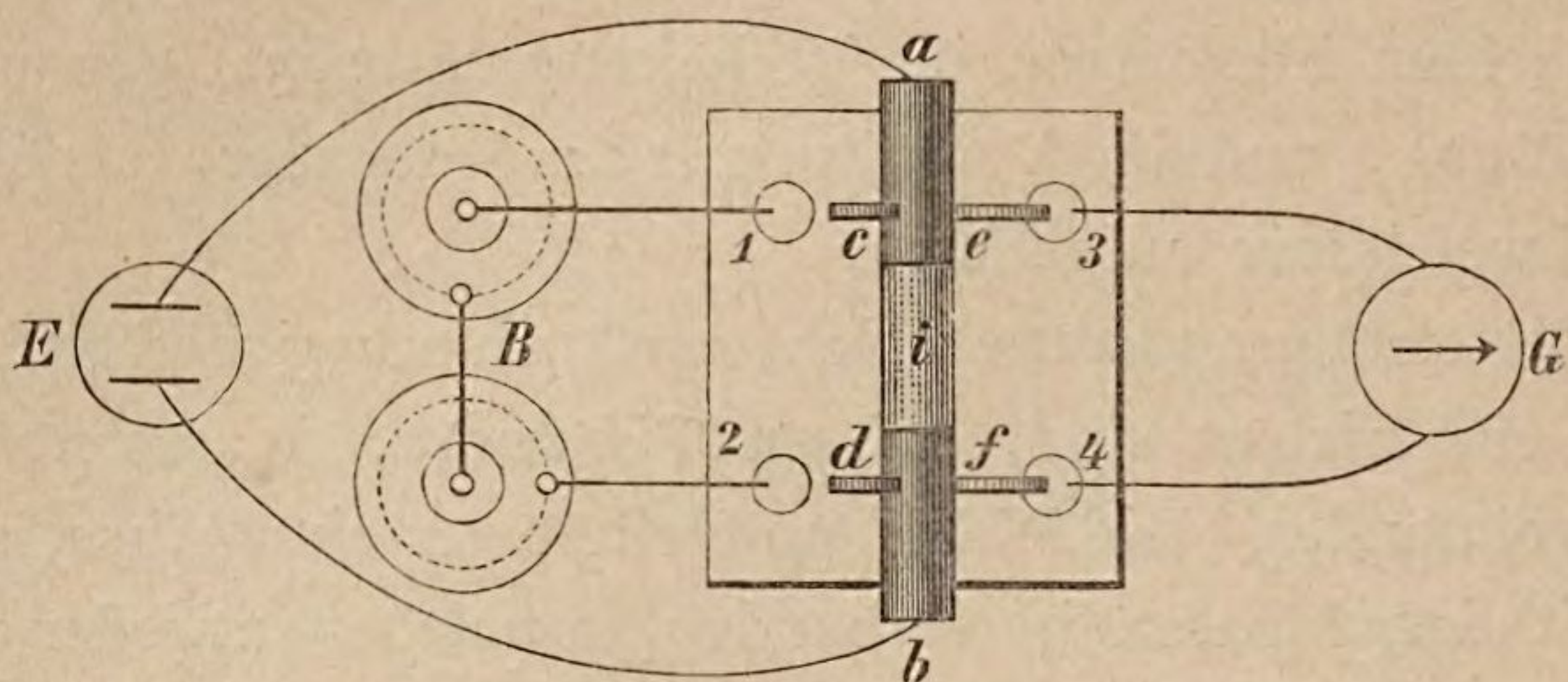
Fig. 30.



Wenn Metallplatten als Electroden bei einer Electrolyse gebraucht worden sind, so zeigen sie fast ausnahmslos eine Veränderung in ihrem electrischen Verhalten. Ich tauche zwei Platinplatten in verdünnte Schwefelsäure und verbinde sie mit den beiden Drahtenden unseres Galvanometers mittelst einer *Wippe*, d. h. einer Vorrichtung, welche es möglich macht, schnell eine Drahtverbindung aufzuheben und dafür eine andere herzustellen. Ich wähle als Wippe ein Brett mit vier Queck-

silbernäpfen; die metallene Axe $a\ b$ ist durch das isolirende Stück i in zwei Theile zerlegt, deren jeder zwei Metallhaken c und e , d und f trägt. Drehe ich die Axe nach der einen Seite hin, so tauchen c und d in das Quecksilber, nach der anderen e und f . Nun verbinde ich die beiden

Fig. 31.



Electroden des Wasserzersetzungapparates E mit den beiden Axenenden a und b , die Pole der zersetzenden Batterie B mit den Näpfen 1 und 2 , und die Enden des Galvanometerdrahtes mit 3 und 4 . Dazu drehe ich die Axe so, dass e und f in 3 und 4 eintauchen. Das Galvanometer bleibt in Ruhe. Drehe ich die Axe, bis die Drähte c und d in 1 und 2 eintauchen, so beginnt in E lebhafte Gasentwicklung. Ich drehe die Axe in ihre alte Lage zurück, und sofort giebt die Galvanometernadel einen heftigen Ausschlag. Verbinde ich die Enden des Galvanometerdrahtes direct mit den Säulenpolen, so sehen Sie an dem wieder nach derselben Seite hin erfolgenden Ausschlage, dass die Platinplatte, welche mit dem Zink der Säule verbunden war, sich nun auch wieder wie Zink gegen die andere Electrode verhält. Die beiden Platinplatten sind also nicht mehr electrisch indifferent gegen einander, wir finden vielmehr, dass die mit dem positiven Batteriepol verbunden gewesene Electrode sich wie ein in der Spannungsreihe dem negativen Ende näher stehender, die mit dem negativen Pol verbunden gewesene wie ein dem positiven Ende näher stehender Körper verhält und sagen dann: die Electroden sind *polarisirt*. Lasse ich die vorhandene Verbindung einige Zeit hindurch bestehen, so geht die Galvanometernadel allmählich auf ihre Ruhelage zurück, die Polarisation verschwindet also langsam wieder. Die Ursache der eintretenden Polarisation sind die sich auf den Electroden ablagernden Substanzen, in erster Reihe die Gase. Eine mit Wasserstoff bedeckte Platinplatte verhält sich nicht mehr wie reines Platin; mit solchem zu einem Element verbunden, verhält sie sich gegen dasselbe

wie Zink gegen Kupfer, sie ist positiv polarisirt, umgekehrt erscheint eine mit Sauerstoff bekleidete Platinplatte negativ polarisirt.

Diese unmittelbare Einwirkung, welche die Gase auf das electromotorische Verhalten der Metalle ausüben, zeige ich Ihnen an einem *Gas-element*. In zwei Glasröhren sind zwei Platinblechstreifen eingekittet, so dass die Röhren unten offen, oben geschlossen sind, und nur die mit den Platten verbundenen Leitungsdrähte heraustreten lassen. Ich habe beide Röhren mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt und in ein Gefäss mit derselben Flüssigkeit umgestürzt. Verbinde ich die beiden Leitungsdrähte mit dem Galvanometer, so bleibt dasselbe in Ruhe, weil sich die vorhandenen Spannungsdifferenzen ausgleichen. Lasse ich aber jetzt in die eine Röhre Wasserstoffgas treten, so zeigt das Galvanometer einen Strom an, in welchem sich das mit Wasserstoff bekleidete Platin als das positive Metall verhält. Sauerstoff, unter gleichen Umständen in das Gaselement eingeführt, würde nur eine geringe electromotorische Wirkung zeigen. Wenn trotzdem die Polarisation, welche die beiden Platinplatten bei der Electrolyse der verdünnten Schwefelsäure anzeigen, an beiden Polen fast die gleiche ist, so kommt das wohl daher, dass ein Theil des freiwerdenden Sauerstoffes als Ozon auftritt. Dieser Körper verhält sich in vielen Beziehungen den Gasbildern analog und diese, namentlich Chlor, bringen eine starke negative Polarisation hervor.

Die absolute Grösse der Polarisation ist viel beträchtlicher, als man gewöhnlich glaubt; sie wächst mit der Stärke des electrolysirenden Stromes und namentlich mit seiner Dichte und erreicht bei Platinplatten in verdünnter Schwefelsäure die Kraft von 2,3 Daniellelementen. Dadurch wird es begreiflich, dass man mit einem einzelnen Daniellelement niemals verdünnte Schwefelsäure so zersetzen kann, dass sich die Gase frei entwickeln. Allerdings beginnt die Zersetzung, aber die sich sogleich entwickelnde Polarisation setzt sich der primären Kraft des Elementes entgegen und der Strom hört ganz auf. Dass aber wirklich eine electrolytische Leitung bei diesem Versuche stattfindet, dafür ist eben das Auftreten der Polarisation, die wir am Galvanometer nachweisen können, der Beweis, und so können wir überhaupt die Polarisation benutzen, um zu untersuchen, ob eine electrolytische Leitung stattgefunden hat, oder nicht. Eine Glasstange z. B., welche beim Erwärmen zum Leiter der Electricität wird, zeigt an den Zuleitungsdrähten Polarisation, sie leitet also electrolytisch bei einer Temperatur, bei der sie lange noch nicht flüssig ist.

Nicht nur an den Grenzen metallischer und flüssiger Leiter tritt

die Polarisation auf, sondern überall, wo ein Strom von einem andern Leiter her in einen Electrolyten eintritt, also auch da, wo zwei Electrolyte an einander grenzen und ebenso im Innern fester Massen, welche von einem Electrolyten durchtränkt und von einem Strome durchflossen sind.

Nur eine einzige Combination von Electroden und Leitungsflüssigkeit ist bekannt, welche gar keine Polarisation erzeugt, das ist Zinkvitriollösung zwischen amalgamirten Zinkplatten, und darum konnten wir den Widerstand dieser Lösung ganz wie den eines Leiters erster Klasse messen, während wir in allen andern Fällen entweder die Wirkung der Polarisation unschädlich machen oder ihren Einfluss auf die Grösse der Stromstärke in Rechnung ziehen müssen. Dies geschieht nach dem allgemeinen Gesetze, dass sich sämmtliche in der Kette enthaltenen electromotorischen Kräfte zu einander addiren, oder, wenn sie entgegengesetzt sind, sich von einander abziehen. Heisst also die electromotorische Kraft der Polarisation p , so wird der Ausdruck für die Stromstärke lauten:

$$S = \frac{a - p}{R + r}.$$

Man giebt oft an, dass beim Uebergange des Stromes aus einer Electrode in einen Electrolyt sich noch ein besonderer Widerstand bilden solle, der nicht als eine entgegengesetzte electromotorische Kraft in den Zähler des Ausdruckes für die Stromstärke tritt, sondern als ächter Widerstand sich zu den übrigen im Nenner stehenden Widerständen addire. Das ist in der That in vielen Fällen wahr, weil in Folge der Electrolyse eine Electrode mit schlechter leitenden Flüssigkeiten oder sogar festen Ablagerungen umgeben wird; wo das aber nicht der Fall ist, wie bei der Zinkvitriollösung zwischen amalgamirten Zinkplatten, da tritt auch kein solcher Uebergangswiderstand auf. Derselbe ist also ebenfalls ein neu hinzugekommener Leitungswiderstand.

Alle electrolytischen Vorgänge sind im Innern der Batterie dieselben, wie in einer äusseren Leitungsflüssigkeit. Da alle in der Praxis angewandten Elemente das Gemeinsame haben, dass als positives Metall in ihnen Zink angewandt wird, so wird auch bei gleichbleibender Stromstärke in einem jeden Elemente der Batterie eine Zinkmasse gelöst werden, welche dem in einem Voltameter, das gleichzeitig in den Strom eingeschaltet ist, ausgeschiedenen Silber oder Kupfer äquivalent ist. Wir wollen annehmen, dass die Elemente, mit welchen wir zu thun

haben, als Leitungsflüssigkeit verdünnte Schwefelsäure enthalten; dann wird die einzige Veränderung, welche der Strom auf der Seite des Zinks in den Elementen hervorbringt, der sein, dass das Zink, der Stärke und Wirkungszeit des Stromes entsprechend, an Gewicht verliert; eine Veränderung in seiner chemischen Beschaffenheit oder in seinem electromotorischen Zustande erfährt es nicht. Wir brauchen es nur noch davor zu schützen, dass es, ohne dass der Strom geschlossen wäre, durch den rein chemischen Angriff der verdünnten Säure aufgelöst wird, und zu dem Ende amalgamiren wir es. Anders ist der Vorgang auf der Seite des negativen Metalles. An diesem scheidet sich das positive Ion, der Wasserstoff, aus, von dem wir gesehen haben, wie stark positiv polarisierend er auf die Metalle, zunächst auf das Platin, dann aber auch auf andere, wirkt. Das Kupfer in einem Kupferzinkelement, das Platin in einem Platinzinkelement, u. s. w., sie werden mit theils gasförmig auftretendem, theils in der Flüssigkeit sich lösendem, theils in das Metall selbst eindringendem Wasserstoff (wie das beim Platin und in noch höherem Grade beim Palladium beobachtet ist) bedeckt, und dadurch positiv polarisirt. Sie rücken also in ihrer electromotorischen Stellung dem Zink näher, die Spannungsdifferenz zwischen beiden wird kleiner und damit ist der wesentlichste Grund gelegt für das Inconstantwerden der Elemente. Die Aufgabe, diese Inconstanz zu beseitigen, ist noch nicht gelöst, wir nennen aber die Ketten *constante*, in welchen Mittel angewandt werden, um die Polarisation der negativen Metallplatte durch den Wasserstoff möglichst zu beseitigen. Diese Mittel bestehen darin, dass man die Ausscheidung des Wasserstoffes ganz verhütet und statt seiner entweder wieder dasselbe Metall, welches die negative Platte bildet, oder gar nichts freierwerden zu lassen strebt. Das erste geschieht in dem ältesten und besten der constanten Elemente, dem von Daniell. Das amalgamirte Zink bleibt umgeben von verdünnter Schwefelsäure, das Kupfer aber taucht in Kupfervitriollösung und beide Flüssigkeiten werden durch eine poröse Wand von einander getrennt. Wie wir vorher sahen, schlägt sich jetzt auf dem Kupfer wieder nur Kupfer nieder, so dass die einzigen in dem Elemente stattfindenden Vorgänge sein sollten, dass das Zink dünner, das Kupfer dicker wird. Der eintretenden Erschöpfung der Kupfervitriollösung kann man durch Beigabe von Vitriolkrystallen abhelfen, aber vollkommene Constanz erreicht man doch nur auf kurze Zeit, da die Diffusion der beiden Flüssigkeiten mit einander bald störend eingreift. Für Apparate, welche für lange Zeit beisammen

bleiben sollen, wie z. B. für therapeutische Zwecke, sind besser scheidende, wenn auch mehr Widerstand leistende Diaphragmen vorzuziehen und so entstand die äusserst zweckmässige Siemens'sche Modification der Daniell'schen Batterie. Es können auch die Diaphragmen ganz fortfallen, wenn man mit Meidinger die Kupfervitriollösung sich lediglich durch ihr grösseres specifisches Gewicht von der zweiten Flüssigkeit, der Bittersalzlösung, sondern lässt. Solche Batterien vertragen selbstverständlich keinerlei Bewegung.

Die übrigen constanten Ketten folgen dem zweiten Princip, aber mit noch weniger Glück. So die Grove'sche und die Bunsen'sche, in denen das Platin oder die Kohle mit starker Salpetersäure umgeben werden, zu deren Reduction der Wasserstoff verbraucht wird. Die Salpetersäure verdünnt sich aber dabei beständig und stösst ausserdem Untersalpetersäuredämpfe aus; die Folgen der Diffusion zeigen sich auch, wie bei Daniell's Element. Wir können aber doch diese beiden Elemente bisher durch kein drittes ersetzen, wenn es sich darum handelt, mit grossen electromotorischen Kräften und äusserst geringen Widerständen zu arbeiten, wie bei der Galvanokaustik; für die Electrotherapie wird man sie nie anwenden. Für letzteren Zweck, für welchen die Einführung grosser Widerstände von geringem Belange ist, werden vorzugsweise noch zwei mehr oder minder unvollständige Arten, den Strom constant zu halten, angewandt: der Zusatz von Chromsäure zur Leitungsflüssigkeit, welche im Strom zu Chromoxyd reducirt wird, wie in Stöhrer's Elementen, oder die gleichzeitige Benutzung der Kohle und des Braunsteins, wie in Leclanché's. Diese letztere Art der Depolarisation ist sehr empfehlenswerth. Die Kohle dient ihrer guten Leitungsfähigkeit wegen dazu, die einzelnen, an sich sehr schlecht leitenden Braunisteitheilchen unter einander zu verbinden, und diese geben einen Theil ihres Sauerstoffes zur Bindung des Wasserstoffes ab. Solche Combinationen eignen sich auch mehr als alle früher genannten zur Ausführung in sehr kleinen Dimensionen, zumal als Flüssigkeit in ihnen gar keine Säure, sondern nur Salmiaklösung vorkommt; die Kleinheit der Dimensionen hat auch, wie ich früher gezeigt habe, gar keinen directen Nachtheil bei Arbeiten, bei denen schon von vorn herein ein grosser Widerstand vorhanden ist, wohl aber einen indirecten, denn die Polarisation wächst mit der Dichte des Stromes und man darf deshalb nie erwarten, unter sonst gleichen Umständen kleine Elemente auf die Dauer so gut depolarisirt zu sehen, wie grosse. Freilich erholen sich schon nach

kurzer Stromöffnung die Elemente nach der Leclanché'schen Construction fast vollständig wieder.

Die Chromsäureelemente bieten im Gegentheil nur einen geringen Widerstand und man hat daher oft versucht, durch sie die anderen mit geringem Widerstand begabten constanten Elemente, besonders die Grove'schen und Bunsen'schen, zu ersetzen; doch sind sie diesen gerade in den Fällen, wo man ihrer am nöthigsten bedürfte, d. h. in denen auch der äussere Widerstand gering ist, an Constanz nicht gewachsen.

SIEBENTER VORTRAG.

Meine Herren!

In den electrolytischen Processen haben wir eine Arbeitsleistung des galvanischen Stromes kennen gelernt. Ich will diesen Begriff in grösserer Allgemeinheit betrachten. Wir hatten die Bewegung der Electricität im Strome verglichen mit dem Abfliessen des Wassers von einem höheren zu einem niederen Niveau. Wenn wir nun wieder auf diesen Vergleich zurückkommen und uns denken, die electricische Masse, welche in der Zeiteinheit durch jeden Querschnitt des Leiters geht (d. h. also die Stromstärke $= S$), bewege sich durch die auf sie wirkenden Triebkräfte gerade so von einer Niveauhöhe bis zu einer anderen um a tiefer liegenden Niveaufläche, wie das Wasser vermöge seines Gewichtes um dieselbe Höhe fallen würde (nur mit einer gleichförmigen Geschwindigkeit, wie früher besprochen wurde), so ist die von den electricischen Triebkräften geleistete Arbeit

$$A = S \cdot a,$$

d. h. gleich der Stromstärke mal der Spannungsdifferenz oder electromotorischen Kraft. Bei gleichbleibender Stromstärke ist daher die Arbeit des Stromes unmittelbar das Maass der electromotorischen Kraft. Das Ohm'sche Gesetz hat uns nun gesagt, dass

$$S = \frac{a}{w}$$

sei, oder $a = S \cdot w$; beide Ausdrücke vereinigen sich in den einen

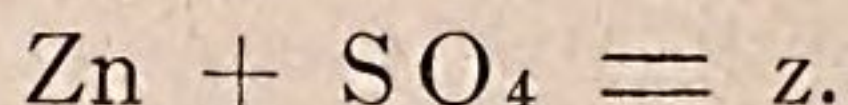
$$A = S^2 \cdot w,$$

die *Stromesarbeit* ist das Product aus dem Quadrat der Stromstärke und dem Widerstand.

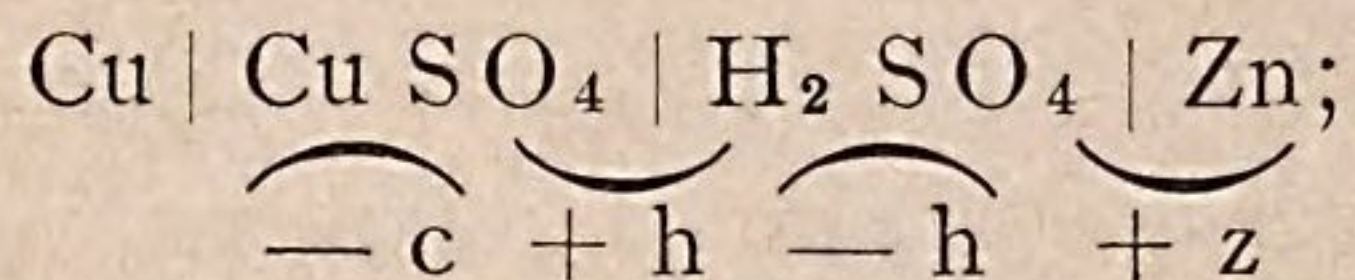
Wir werden Gelegenheit haben, die Bedeutung dieses Gesetzes sogleich kennen zu lernen. Zuvor aber wollen wir untersuchen, welches denn die Quelle der geleisteten Arbeit ist in dem Sinne, wie wir die Heizung als die Arbeitsquelle der Dampfmaschine, die Ernährung als die Arbeitsquelle des Thieres zu betrachten haben. Wie bei diesen beiden Arbeitsmaschinen finden auch bei der Arbeit des galvanischen Stromes chemische Processe statt und wie dort können wir die dabei erzeugte Wärme als die Quelle der Stromesarbeit betrachten. Gehen wir aus von den Processen, welche in einem Daniellelement stattfinden; seine Anordnung war folgende:



der in ihm stattfindende chemische Process besteht darin, dass sich Cu von SO_4 trennt und dadurch Kupfer frei wird, dass das Säureradical SO_4 sich durch H_2 zu Schwefelsäure ergänzt, während das letzte Säureradical, nachdem es sich von H_2 geschieden hat, sich mit Zink verbindet. Durch thermochemische Messungen, welche ganz ohne Zusammenhang mit den Vorgängen des Stromes angestellt worden sind, kennen wir die Wärmemengen, welche frei werden, wenn sich das Radical SO_4 verbindet mit Cu, mit H_2 und mit Zn; sie sollen heissen



Trennt sich nun SO_4 von einem der drei genannten Körper, so werden ganz dieselben Wärmemengen, welche bei eintretender Verbindung frei werden, wieder verbraucht, wir bezeichnen also diese verbrauchten Trennungswärmen der Reihe nach mit $-h$, $-c$ und $-z$. Hiernach werden sich die vorher besprochenen Vorgänge im Daniellelement, bei welchen abwechselnd Wärme verbraucht und frei wird, so schreiben lassen:

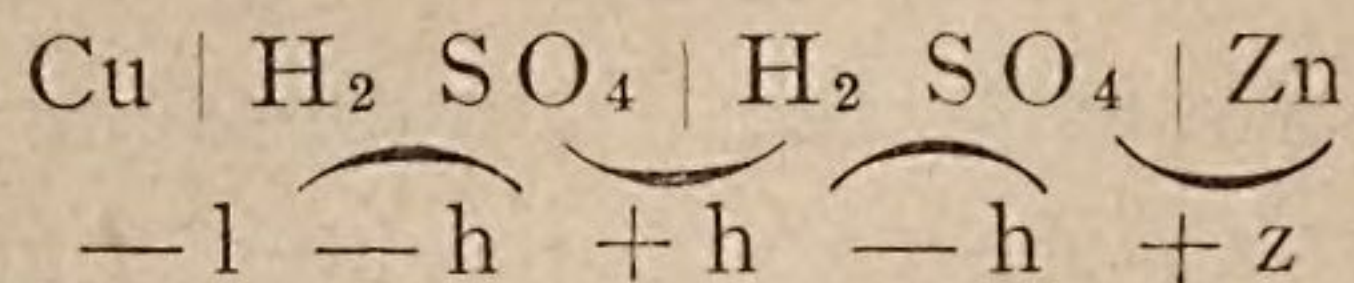


die gesammte, durch diese sämtlichen Processe erzeugte Wärme ist also

$$\tau = z - c.$$

Wäre das Element kein constantes, sondern ein gewöhnliches Kupferzinkelement mit verdünnter Schwefelsäure als einziger Leitungsflüssigkeit gewesen, so wäre der Process ein wenig geändert, es wäre nämlich am Kupfer Wasserstoff frei geworden, und deshalb noch eine

neue Wärmemenge l verbraucht, welche beim Uebergang des Wasserstoffes in den Gaszustand latent wird. Wir können also jetzt so schreiben:



oder

$$\tau = z - h - l$$

und diese geringere Wärmeproduction erhält eben ihren Ausdruck in der geringeren electromotorischen Kraft der inconstanten Kette.

Aehnlich wäre die Betrachtung ausgefallen, wenn wir zwar eine Daniell'sche Säule, vielleicht eine dreipaarige, angewandt, dieselbe aber nicht direct durch einen Draht, sondern durch einen Wasserzersetzungsgesetzapparat geschlossen hätten, in dem sich bekanntlich nur Sauerstoff und Wasserstoff entwickeln. Wenn wir die bei der Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wassergas und Verdichtung des Wassergases zu Wasser frei werdende Wärme mit v bezeichnen, so wird die bei der Entwicklung von H_2 und O aus flüssigem Wasser verbrauchte Wärme wieder mit $-v$ zu bezeichnen sein; im Ganzen liefern also jetzt die drei Daniellelemente, in deren Strom der Wasserzersetzungsgesetzapparat eingeschaltet ist, die Wärmemenge

$$3 \tau - v \text{ oder } 3 (z - c) - v.$$

Und hätten wir endlich den Zersetzungsgesetzapparat durch ein Kupfervoltmeter ersetzt, dessen positive Electrode selbst aus Kupfer besteht, so würde sich an der Kathode ebenso viel Cu von SO_4 geschieden, wie an der Anode Cu mit SO_4 verbunden haben, die freigewordene und verbrauchte Wärme hätten sich also im Voltmeter aufgehoben, so dass wieder nur die Wärmeproduction der Batterie selbst, nämlich 3τ übrig geblieben wäre. Dass die so berechneten Wärmemengen wirklich die sind, welche von den galvanischen Combinationen geliefert werden, lehrt der Versuch. Man braucht nur die ganzen Apparate, die Elemente oder Säulen mit oder ohne eingeschaltete Voltmeter in einen calorimetrischen Apparat zu bringen, so erhält man ganz nahe dieselben Wärmemengen, welche nach unseren Summationen zu erwarten waren.

Nun wissen wir, dass durch den Aufwand einer Wärmeeinheit, d. h. der Wärmemenge, welche ein Kilogramm Wasser um 1° erwärmt, eine Arbeit von 424 Kilogramm Metern erzeugt werden kann. Ist also die bei der Lösung von jedem Kilogramm Zink in dem angewandten galvanischen Elemente freiwerdende Wärmemenge $= \tau$ und werden durch

den Strom τ in der Zeiteinheit n Kilogramm Zink gelöst, so entsteht durch den Strom S eine Arbeit von

$$424 \cdot S \cdot n \cdot \tau \text{ Kilogrammmetern.}$$

Vorher hatten wir die Stromarbeit bezeichnet mit

$$S \cdot a;$$

dasselbe also, was wir früher die electromotorische Kraft, a , nannten, das tritt uns jetzt entgegen als das Product

$$424 \cdot n \cdot \tau,$$

d. h. als eine unmittelbare Folge der im Elemente vorhandenen chemischen Vorgänge. In diesem Sinne hat man in der That den chemischen Process als die Quelle der electromotorischen Kraft zu betrachten. Der früher mit Heftigkeit geführte Streit der chemischen gegen die Contacttheorie, in welchem die ganzen Spannungserscheinungen in Abrede gestellt wurden, ist gegenstandslos geworden, da beide Reihen von Erscheinungen wesentlich zu einander gehören.

Die chemischen Processe im Innern der Elemente sind aber nicht die einzige Quelle electromotorischer Kraft, welche wir kennen; statt ihrer kann auch von aussen her zugeführte Wärme, wie bei den Thermoströmen, oder von aussen her zugeführte Arbeit, wie bei den Inductionsströmen, die ganze oder einen Theil der Arbeitsquelle liefern. Ebenso kann die hervorgebrachte Arbeit des Stromes uns in verschiedenen Formen begegnen: wieder als chemische Wirkung, und davon haben wir bei der Electrolyse gehandelt, oder als mechanische Arbeit oder auch als Erwärmung der Leiter. Ueber diese letzte Gestalt der Arbeit sagt uns das Nähere das vorher gefundene Gesetz, nach welchem die Stromarbeit im Leiter mit dem Quadrat der Stromstärke und mit dem Widerstande des Leiters wächst, also

$$A = S^2 w.$$

Tritt diese ganze Stromarbeit als Wärme auf, so entspricht wieder jeder Arbeitseinheit $\frac{1}{424}$ Wärmeeinheit, die erzeugte Wärme ist also

$$Q = \frac{1}{424} S^2 w.$$

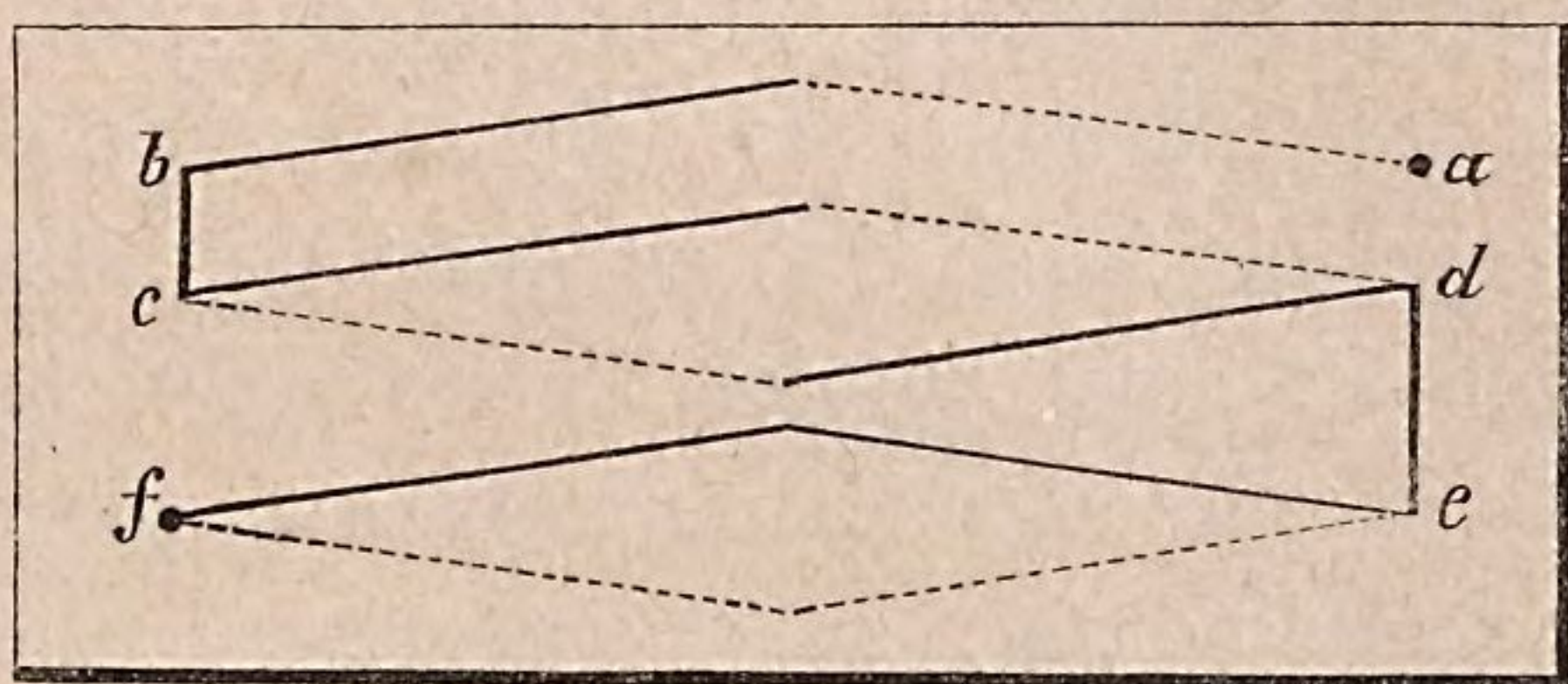
Dies ist das Joule'sche Gesetz über die *Wärmeerregung* durch den Strom, das in ganz analoger Form schon früher von Riess für die durch den Entladungsschlag der leydener Batterie erzeugte Wärme aufgefunden war. Besteht der Leiter aus mehreren hintereinander liegenden Stücken, so wird die Stromstärke zwar in einem jeden gleich gross sein, die

Wärmeerregung in einem jeden aber ist um so grösser, je grösser sein Widerstand ist. Ich habe einen zusammenhängenden Leiter gebildet, welcher nach der Reihe aus dickem Kupferdraht, dünnem Kupferdraht, dickem Silber-, dünnem Silber-, dickem Platin-, dünnem Platin- und dickem Aluminiumdraht besteht. Durch diesen Leiter führe ich den Strom einer sechspaarigen Grove'schen Batterie. Sogleich glüht der dünne Platindraht und zwar er allein, alle anderen Drähte sind zu gute Leiter, entweder wegen ihres grossen Querschnittes oder ihrer specifischen Leitungsfähigkeit, um auch bis zum Glühen gebracht zu werden. Verstärke ich den Strom mehr und mehr, so würde zunächst der dicke Platindraht glühen, aber ehe das geschieht, schmilzt, wie Sie sehen, der dünne. Wir können also an einer beliebigen Stelle einer Leitung ein Glühen hervorbringen, wenn wir an dieser Stelle einen nicht zu langen, dünnen Platindraht einschalten, während der übrige Theil der Leitung aus dicken Kupferdrähten besteht. Ebenso leicht, wie ein Platindraht, glüht ein Eisendraht von gleicher Dicke, aber er verbrennt dabei.

Ich will die sichtbare Erscheinung des Glühens von Drähten benutzen, um einige früher schon besprochene Thatsachen durch Versuche zu belegen. Dazu wende ich eine sechspaarige Grove'sche Säule an, welche sich in einem runden Glasgehäuse, oben mit einem Holzdeckel bedeckt, vollkommen eingeschlossen befindet. Im Innern des Gehäuses steht ein Gefäss mit gelöschtem Kalk, welches die sich entwickelnden Säuredämpfe absorbiert (Vorlesungsbatterie). Ueber den Deckel ragen zwölf mit Quecksilbernäpfen versehene Drähte hervor, welche mit den sechs Zink- und den sechs Platinplatten der Elemente verbunden sind. Ich kann vier Holzringe auf diesen Deckel legen, deren Jeder eine, in die Näpfe eintauchende, Drahtcombination trägt, durch welche die sechs Elemente in die vier Verbindungen 6×1 , 3×2 , 2×3 und 1×6 gebracht werden können. Solche Verbindungsstücke haben wir schon früher als *Pachytrope* kennen gelernt. Ich befestige an den beiden Polschrauben zwei dicke Kupferdrähte, welche durch einen dicken Platindraht mit einander verbunden sind. Wird der Strom durch die sechspaarige Batterie mit einfacher Plattengrösse erregt, so glüht der Draht nicht, wird er erregt durch eine dreipaarige mit doppelter Plattengrösse, so glüht er; stärker aber kommt er zum Glühen durch die zweipaarige Batterie mit dreifacher Plattengrösse, während er durch die einpaarige Batterie mit sechsfacher Plattengrösse wieder weniger stark glüht. Wir

haben also das früher berechnete Maximum der Wirkung durch die dritte Combination erreicht gehabt. Bei galvanokaustischen Arbeiten hat man mit Drähten sehr verschiedener Widerstände zu thun. Eine lange Drahtschlinge bietet einen so bedeutenden Widerstand, dass man sie am besten durch die erste Combination (6×1) zum Glühen bringen wird, während der kurze konisch aufgewundene, dicke Draht, welcher das Glüheisen ersetzt, durch die dritte oder vierte Combination (2×3 oder 1×6) seine höchste Temperatur erhalten wird. Selbstverständlich sind hierbei die Dimensionen der Elemente, welche zur Verfügung stehen, maassgebend.

Fig. 32.



Ich habe ferner auf ein Brett eine Drahtverzweigung angebracht. Ein Strom, welcher von a her eintritt, geht hintereinander durch einen Platin- und einen Silberdraht bis b; von c aus verzweigt er sich in zwei gleiche Zweige, deren jeder wieder hintereinander aus einem Platin- und Silberdraht besteht. Bei d wieder gesammelt, verzweigt er sich abermals bei e und zwar ist der eine Zweig ein Platin-, der andere ein Silberdraht. Alle Drähte sind von gleicher Dicke: (die Platindrähte sind durch punktirte Linien dargestellt). Wir wissen, dass der specifische Widerstand des Platins 8mal so gross ist, als der des Silbers. Geht nun der ungetheilte Strom von a nach b mit der Stärke 1, so unterscheiden sich beide Leiterstücke nur durch ihren Widerstand, im Platindraht wird also 8mal so viel Wärme entwickelt, wie im Silberdraht. In jedem Zweige der Leitung c d ist die Stromstärke nur $\frac{1}{2}$, die Wärme-Entwicklung also nur $\frac{1}{4}$ von der in den entsprechenden Stücken der Leitung a b; in den Platindrähten ist wieder die Wärmeentwicklung 8mal so gross wie in den Silberdrähten. Von d aus geht der Strom wieder gesammelt nach e und dann verzweigt bis f, aber die Strom-

stärken in beiden Zweigen verhalten sich jetzt zu einander wie 1 : 8 durch den Platindraht geht $\frac{1}{9}$, durch den Silberdraht gehen $\frac{8}{9}$ des Stromes; die Wärmeerregung im Platin ist also diesmal die kleinere. Der geringeren Stromstärke wegen sollte sie 64mal kleiner sein, als die im Silber, des grösseren Widerstandes wegen 8mal grösser, sie ist also in der That nur 8mal kleiner. Diese drei verschiedenen Vorgänge stellen sich nun so dar:

Leite ich den Strom der sechspaarigen Grove-Batterie durch alle drei Theile der Leitung hintereinander, so glüht der Platindrath in a b sehr hell, die beiden Platindrähte in c d glühen schwach. In d e werden Sie kein Glühen bemerken, der Strom ist schon zu sehr geschwächt. Leite ich aber den Strom einzeln durch die drei Theile, zuerst durch a b, so glüht der Platindraht weiss, dann durch c d, so glühen die Platindrähte roth, endlich durch d e, so glüht der Silberdraht, nicht der Platindraht, in ihm ist 8mal so viel Wärme entwickelt als im Platindraht und obgleich er zu seiner Erwärmung mehr Wärme braucht, als ein gleich schwerer Platindraht, so reicht seine Erwärmung doch noch hin, um ihn bis zum Glühen, sogar bis zum Schmelzen zu bringen.

Wird die metallische Schliessung einer Batterie unterbrochen, so beobachten wir einen Unterbrechungsfunken. Auch dieser ist zu betrachten als ein System ins Glühen versetzter Leiter. Denn nähern wir den mit einem Säulenpole verbundenen Leitungsdraht dem anderen Pole, so wird es nur bei sehr vielpaarigen Säulen, d. h. bei Säulen mit grosser Spannung, gelingen, vor der Berührung einen Funken, einen Schliessungsfunken überspringen zu sehen; entfernen wir nach erfolgter Berührung das eine Drahtende vom Pol, so sind die beiden zuletzt im Contact gewesenen Stellen sehr stark erhitzt, es reissen sich Theilchen von ihnen los und gehen von einem Leiter zum andern über. Dadurch wird eine Verbindung der beiden jetzt getrennten Contactstellen durch eine Schaar dünner Leiterfäden aufrecht erhalten, welche in Folge ihres grossen Widerstandes in lebhaftes Glühen gerathen. Beim electrischen Kohlenlichte benutzen wir dieses Glühen der überströmenden Kohlentheilchen. Werden die Leiterenden zu weit von einander getrennt, so zerreisst der galvanische Lichtbogen, den wir ganz wie einen Stromleiter zu betrachten haben und das ist der Vorgang, den wir in einem jeden Unterbrechungsfunken wahrnehmen.

Gehen wir zu der umgekehrten Erscheinung über: zur Erregung

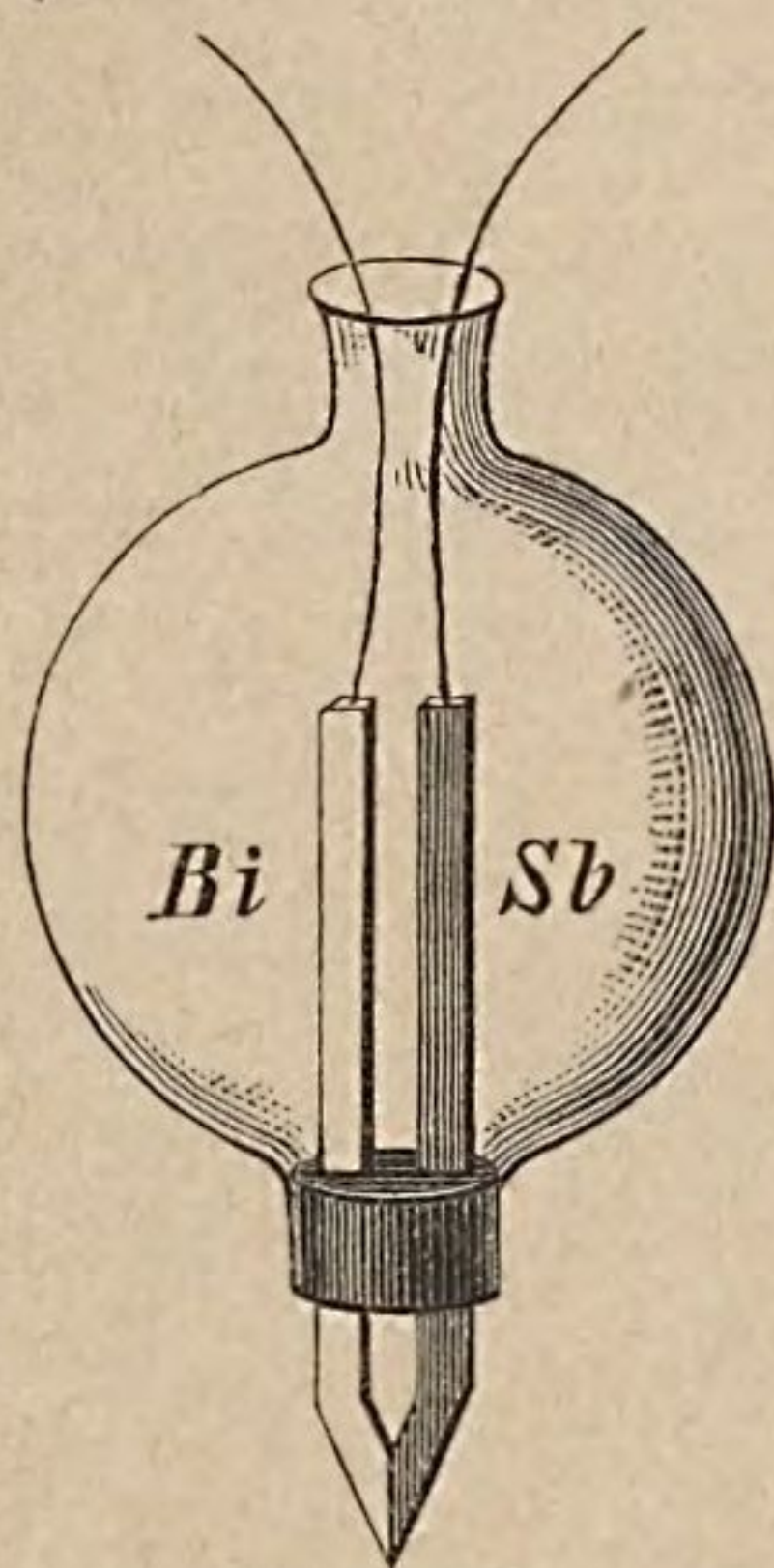
von Electricität durch Wärme. Durch Versuche ist festgestellt worden, dass die Metalle in Bezug auf ihr Leitungsvermögen für Electricität in ganz derselben Reihenfolge stehen, wie in Bezug auf ihr Leitungsvermögen für Wärme. Wenn wir daher von irgend einem Punkte eines Leiters einen Wärmestrom ausgehen lassen, so liegt es nahe, mit F. Kohlrausch anzunehmen, dass durch denselben gleichzeitig ein Electricitätsstrom entsteht. In einem homogenen metallischen Ringe werden wir hierdurch keinen continuirlichen Strom erzeugen können, weil sich sofort Anhäufungen freier Electricität bilden würden, welche die electromotorische Kraft des Wärmestromes compensiren müssten. Es sind uns aber zwei Fälle bekannt, in denen wir das Vorhandensein solcher Electricitätsbewegung durch die treibende Kraft der Wärme beobachten, das ist die Pyroelectricität der Krystalle und die Thermo-electricität der Metalle.

In säulenartig krystallisirten Krystallen bilden sich nämlich wirklich solche Electricitätsanhäufungen, so lange dieselben von einem Wärmestrom durchflossen sind, d. h. während sie erwärmt oder während sie abgekühlt werden, nicht während sie eine gewisse höhere oder niedrigere Temperatur besitzen. Ich hänge, um Ihnen das zu zeigen, mein Biflar-electroskop auf und electrifizire seine Kugel negativ. Nun nehme ich in eine Zange einen Turmalinkrystall und erwärme ihn in der Gasflamme. Nähere ich ihn schnell dem Electroskop, so ziehen beide Enden der Krystallsäule die Kugel an, der Krystall ist noch unelectrisch. Nun gebe ich ihm Zeit, sich abzukühlen und jetzt zieht sein eines Ende die Kugel noch an, aber stärker, es ist positiv geworden, das andere stösst sie ab, so dass ich sie im Kreise umhertreiben kann; es ist also negativ.

Der zweite, wichtigere Fall, welcher hier in Betracht kommt, ist der der *Thermoströme*. Enthält nämlich unser ganz aus metallischen Leitern zusammengesetzter Ring Contactstellen von verschiedenen Metallen, besteht er z. B. aus zwei Metallen, die sich an zwei Stellen (Löthstellen) berühren, so wird jene Electricitätsbewegung nicht aufgehoben, es entsteht vielmehr wirklich ein thermoelectrischer Strom, dessen electromotorische Kraft lediglich von der Temperatur der beiden Contactstellen und von der Natur der beiden Metalle abhängig ist. Hätten beide Contactstellen dieselbe Temperatur, so würde keine Electricitätsbewegung stattfinden können; wir hätten einfach den Fall eines geschlossenen, aus mehreren Metallen zusammengesetzten Ringes, in dem, wie wir früher gesehen haben, sich sämtliche electromotorische

Kräfte gegenseitig aufheben. Zur Erregung solcher Thermoströme sind alle Leiter geeignet, sogar die Electrolyte; bei der Beobachtung solcher thermoelectrischen Erscheinungen zwischen festen und flüssigen Leitern spielen indess Nebenumstände oft eine störende Rolle. Gleichartige Metalle in zwei Gefässe mit der gleichen Flüssigkeit aber bei verschiedener Temperatur getaucht, geben oft zu Strömen Veranlassung, welche nicht rein thermoelectrisch sind, sondern auf Veränderungen in der Oberflächenbeschaffenheit der Metalle selbst beruhen, so wie auch zwei ganz gleiche in dieselbe Flüssigkeit ungleichzeitig eingetauchte Metallstücke sich electrisch different verhalten. Unter den Metallen sind die stärksten thermoelectrischen Erreger die krystallinischen, Antimon und Wismuth; Kupfer steht zwischen beiden, so dass in einem aus Kupfer und Antimon zusammengesetzten Ringe der Strom an der wärmeren Löthstelle vom Kupfer zum Antimon, an einem aus Kupfer und Wismuth zusammengesetzten vom Wismuth zum Kupfer geht. Die thermoelectromotorische Kraft $\text{Bi} | \text{Sb}$ wird auch hier gleich der Summe $\text{Bi} | \text{Cu} + \text{Cu} | \text{Sb}$ sein. Ich hänge innerhalb eines Kupferwismuthringes eine Magnetnadel auf, so dass der Ring mit der Nadel zusammen gleich selbst den Multiplicator bildet; beim Erwärmen einer Löthstelle durch die Gasflamme wird die Nadel abgelenkt, beim Erwärmen der anderen kehrt sie wieder in ihre Gleichgewichtslage zurück. Ich verbinde die Drahtenden eines sehr empfindlichen Galvanometers, das seine Nadeldrehung durch die Ab-

Fig. 33.



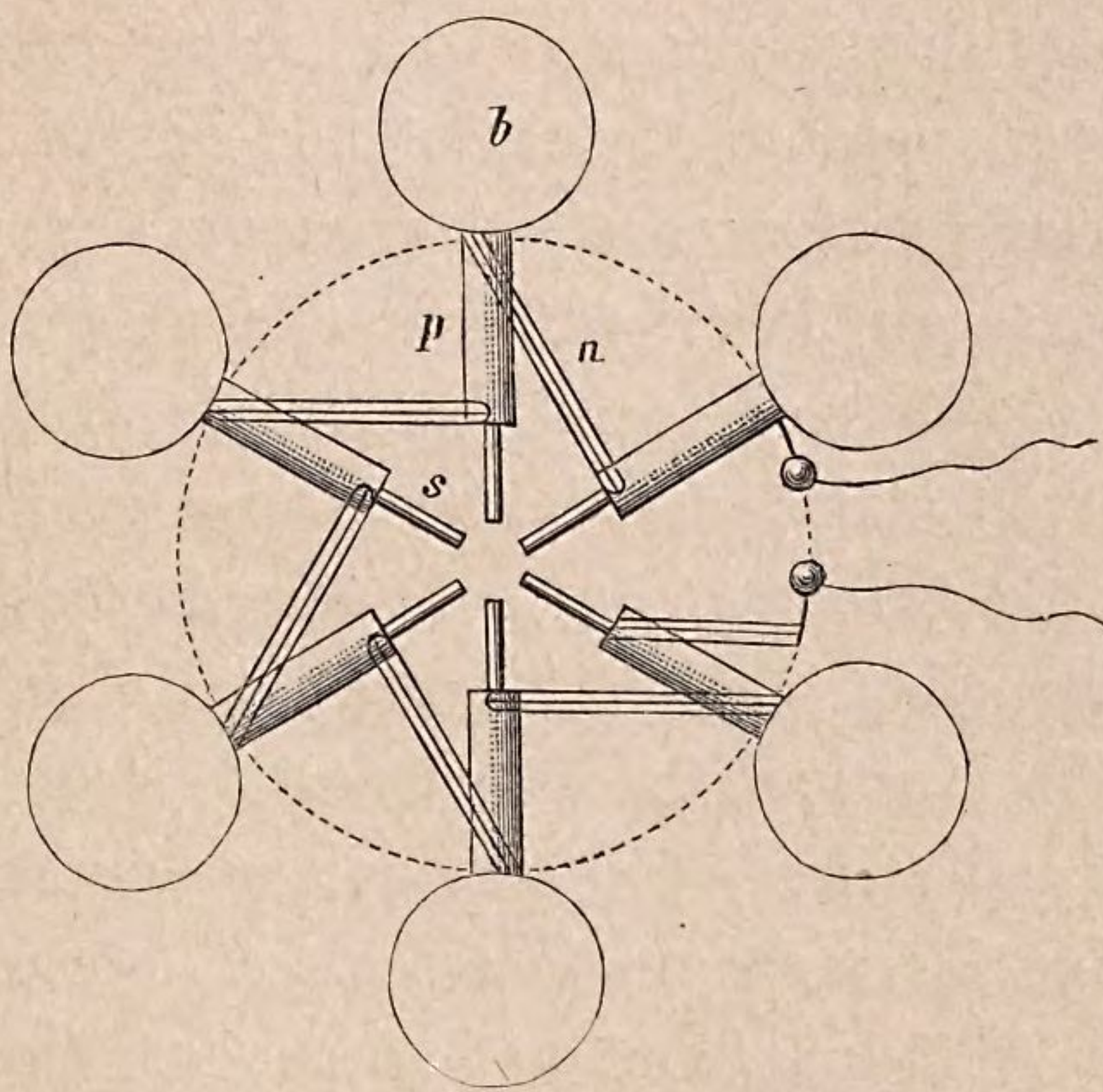
lenkung eines Lichtstrahles, der auf einen von der Nadel getragenen Spiegel fällt, auf einen Schirm, projecirt, mit einem kleinen Wismuth - Antimon - element. Dasselbe hat nur eine Löthstelle, die anderen, freien Enden der Wismuth- und Antimonstäbe sind durch den Kupferdraht des Galvanometers unter einander verbunden, so dass die Combination eigentlich drei Contactstellen hat. Halte ich die Löthstelle des Kupfers mit den beiden anderen Metallen auf constanter Temperatur, etwa indem ich sie mit kaltem Wasser umgebe, so kommt nur die Temperaturveränderung an der Hauptlöthstelle in Betracht. Berühre ich dieselbe mit dem Finger, so zeigt die Verschiebung des Lichtbildes

eine starke Ablenkung der Galvanometernadel an. Ersetze ich endlich dieses Thermoelement durch eine *Thermosäule*, d. h. durch eine grössere Anzahl

nach dem Principe der Batterie mit einander verbundener Wismuthantimonpaare und lasse die auf der einen Seite befindlichen Löthstellen nur durch die Wärme meiner Hand bestrahlen, während die Löthstellen der anderen Seite kalt bleiben, so wird wieder ein Strom durch das Galvanometer angezeigt. So kann mir der Thermostrom als Maass dienen für die Wärme, welche ihn erzeugt.

Die electromotorischen Kräfte, welche bei diesen Strömen in Rede kommen, sind sehr gering. Es würde eine sehr grosse Anzahl von Thermoelementen erfordert werden, um Ströme von solcher electromotorischer Kraft zu erzeugen, wie wir sie durch unsere galvanischen Batterien erhalten. Glücklicher Weise hat die neuere Zeit mehrere Combinationen kennen gelehrt, welche viel grössere thermoelectrische Kräfte liefern, als selbst Wismuth und Antimon; es sind besonders Metalllegierungen, welche für diesen Zweck Anwendung finden. Ich zeige Ihnen die beiden jetzt am meisten empfohlenen Thermosäulen, die von Noë und die von Clamond. In der neuesten Form der Noë'schen

Fig. 34.



Säule liegen sämtliche Elemente in einer Kreisfläche gelagert, so dass die eine Hälfte der Löthstellen, die nach dem Mittelpunkt des Kreises hingewandte, durch eine einzige Flamme geheizt wird, während die andere Hälfte, die nach der Peripherie hin liegende, die erhaltene Wärme durch grosse, schwarze, hier cylindrisch aufgerollte, Bleche *b*, welche der Luft möglichst viel Oberfläche bieten, ausstrahlt. Die positiven Stäbe *p* bestehen aus einer Zinkantimonlegierung, die negativen Draht-

bündel n aus Neusilber. Das Heizen der Löthstellen geschieht durch kupferne Stifte s, welche aus den Zinkantimonstäben hervorragen und durch eine einzige Gasflamme bis zum beginnenden Glühen erhitzt werden. Ich schliesse eine solche zwanzigpaarige Säule durch die Drähte des Verticalgalvanometers und zünde die Flamme an. Die Nadel schlägt sofort gegen ihre Hemmung. Wasser mit der Säule zu zersetzen vermag ich aber nicht, denn die electromotorische Kraft der 20 Elemente ist nicht sehr viel grösser als die eines Daniellelementes. Eine nach älterer Construction ausgeführte 80paarige Thermosäule dagegen, in welcher alle inneren Löthstellen in einer Geraden liegen, während die äusseren wieder mit Kühlblechen versehen sind, liefert durch eine Reihe kleiner Flammen angeheizt eine electromotorische Kraft von 6 bis 8 Daniellelementen; wenn ich deshalb ein Voltameter in ihren Stromkreis einschalte, so erhalte ich eine sehr lebhaft Wasserzersetzung. Bei beiden Säulen tritt die Thätigkeit schnell nach dem Anzünden der Flammen ein.

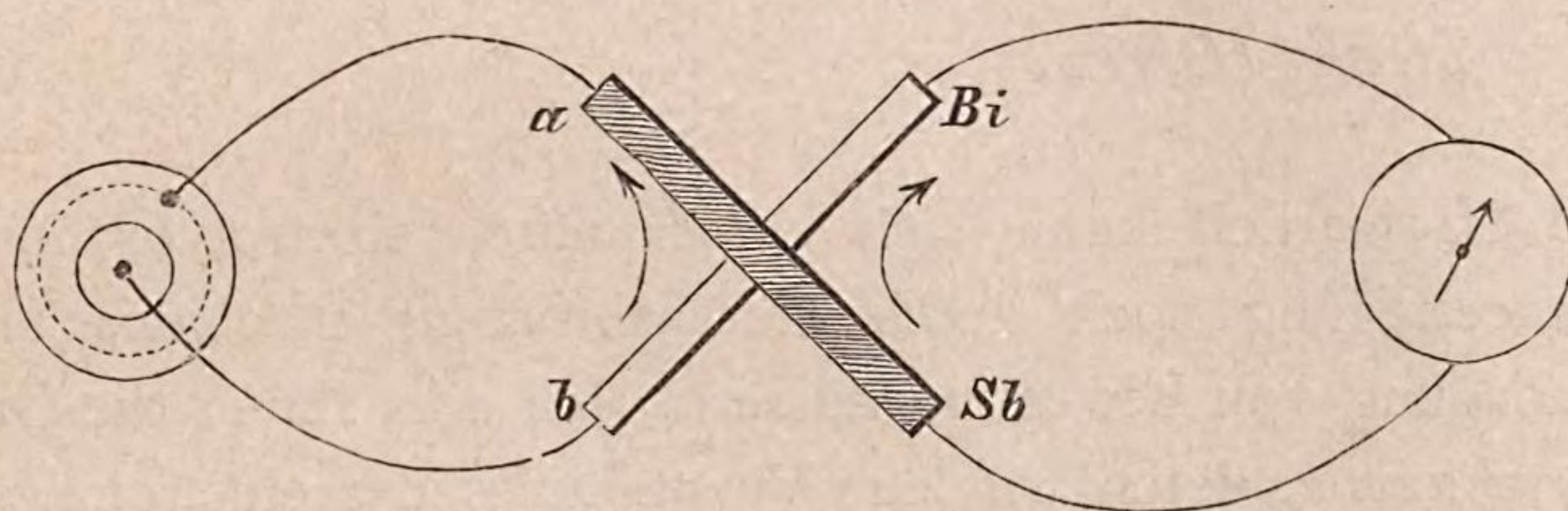
Anders ist es bei den Clamond'schen Säulen. Die Metalle liegen bei ihnen in einem cylindrischen Thonmantel eingebettet, der sie sehr zweckmässig gegen äussere Verletzungen schützt, der dafür aber auch das Anheizen, das durch einen in der Cylinderaxe liegenden Brenner geschieht, sehr verlangsamt. Ist die Säule einmal im Gange, so wirkt sie sehr gleichmässig und zwar mit einer electromotorischen Kraft, welche man bei 120 Elementen leicht auf 4 Daniell bringen kann.

Sie sehen aus diesen Angaben, dass die Möglichkeit, unsere stets den Grund der Inconstanz in sich tragenden, mit Flüssigkeiten gefüllten Batterien durch die sauberen, durch blosses Anzünden von Flammen in Thätigkeit zu setzenden Thermosäulen ersetzen zu können, ganz wohl vorliegt. Allerdings wirken 10 Noëelemente bester Art immer erst wie 1 Daniellelement und wir würden eine 300paarige Thermosäule brauchen, um eine 30paarige Siemensbatterie an electromotorischer Kraft ersetzen zu können. Die Auffindung stärker wirkender Erreger und möglicherweise noch anzubringende Verbesserungen in der Zusammenstellung der Elemente kann uns aber wohl zu einer glücklichen Lösung der Frage, ob wir ewig die Slaven unserer hydroelectrischen Batterien bleiben sollen, führen.

Gerade so, wie wir uns denken konnten, der Wärmestrom erzeuge eine Fortbewegung der Electricität, können wir auch annehmen, der Electricitätsstrom erzeuge eine Fortbewegung der Wärme. In einem homogenen in sich geschlossenen Leiter würde hierdurch jeder Punkt

gleich viel Wärme bekommen und abgeben, wir würden also wieder nichts von der Bewegung bemerken. Befinden sich aber Contactstellen verschiedener Metalle im Leiter, so wird sich wegen der verschiedenen Leitungsfähigkeit der beiden sich berührenden Körper an der einen Contactstelle eine Anhäufung, an der anderen eine Abnahme von Wärme bilden. Wir erhalten eine Abkühlung derjenigen Contactstelle, durch deren Erwärmung der entstehende Thermostrom dieselbe Richtung erhalten haben würde, wie der galvanische Strom, welchen wir jetzt durch das Thermoelement führen. Auch diese Thatsache zeige ich Ihnen an unserem Spiegelgalvanometer. Ich wende dazu ein Peltier'sches Kreuz an, d. h.

Fig. 35.



zwei gegen einander gekreuzte Stäbe von Wismuth und Antimon, also zwei Thermoelemente, welche mit ihren Contactstellen zusammenstossen. Durch das eine Element $a\ b$ führe ich den schwachen Strom eines Stöhrer'schen Eintauchelementes, die Enden des andern Thermoelementes $Bi\ | \ Sb$ sind durch die Galvanometerdrähte geschlossen. Die Nadel wird abgelenkt. Zum Beweise, dass sie eine Abkühlung der Löthstelle angezeigt hat, berühre ich dieselbe mit dem Finger; durch diese Erwärmung erfolgt sogleich die Nadelablenkung in entgegengesetzter Richtung.

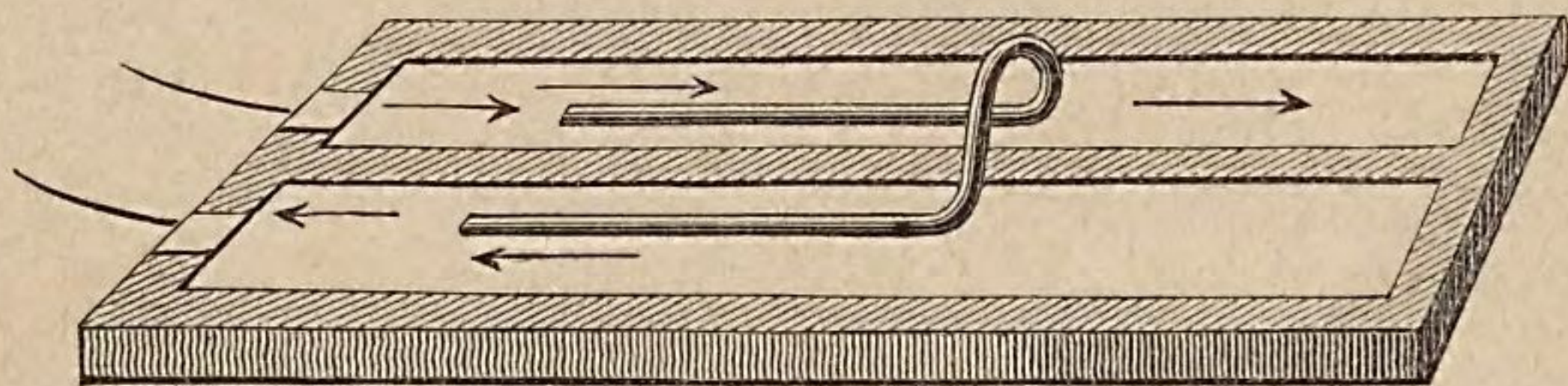
ACHTER VORTRAG.

Meine Herren!

Die Stromarbeit kann sich ausser durch electrolytische Wirkung und Wärmeerregung noch durch Hervorbringung mechanischer Arbeit, durch Erzeugung von Bewegung äussern. Ich will Ihnen die Grundsätze der *Electrodynamik*, deren wir zum Verständniss der electromagnetischen Erscheinungen bedürfen, am Experimente erläutern. Jedes Theilchen eines Leiters, in welchem sich ein Strom bewegt, wirkt auf die Theilchen benachbarter Stromleiter bald anziehend, bald abstossend. Liegen zwei solche Leitertheile in einer geraden Linie, so ziehen sie sich an, wenn ihre Ströme entgegengesetzte Richtung haben, stossen sich aber ab, wenn sie gleiche Richtung haben. Gehören aber die Leitertheile zweien parallel neben einander herlaufenden Leitern an, so ziehen sie sich an, wenn ihre Ströme gleiche Richtung haben, stossen sich aber ab, wenn deren Richtungen einander entgegengesetzt sind.

Um Ihnen den ersten Satz anschaulich zu machen, lasse ich die beiden Poldrähte eines Groveelementes in zwei parallele Quecksilberrinnen

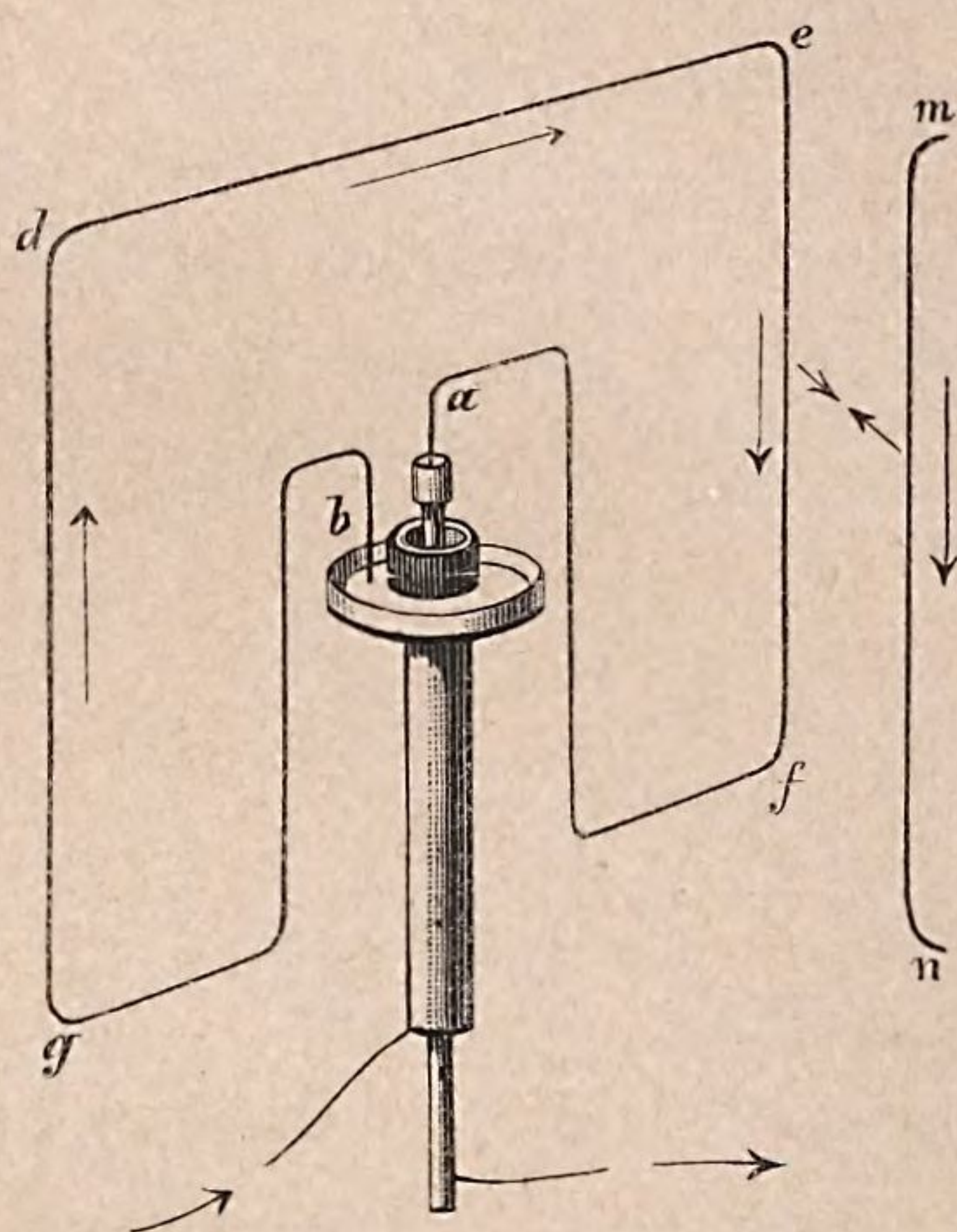
Fig. 36.



ausmünden. Lege ich nun einen dicken Aluminiumdraht, der so gebogen ist, dass seine horizontalen Schenkel auf den beiden Quecksilberflächen schwimmen, während sein gekrümmter Theil beide Schenkel

miteinander verbindet und dadurch den Strom schliesst, auf die Oberfläche, so kann der Strom, da der ganze Draht mit Ausnahme seiner beiden Enden mit Lack überzogen ist, nur an diesen Endpunkten ein- und austreten. In den beiden Schenkeln des Drahtes hat also der Strom dieselbe Richtung, wie in den Quecksilberstrecken, welche zwischen den Drahtenden und den Einströmungsstellen des Stroms liegen, der Drahtbügel wird deshalb von den Einströmungsstellen fortgestossen. Lege ich den Bügel umgekehrt auf die Quecksilberfläche, so dass die freien Drahtenden von den Einströmungsstellen entfernt sind, so schwimmt der Bügel zu diesen hin *).

Fig. 37.



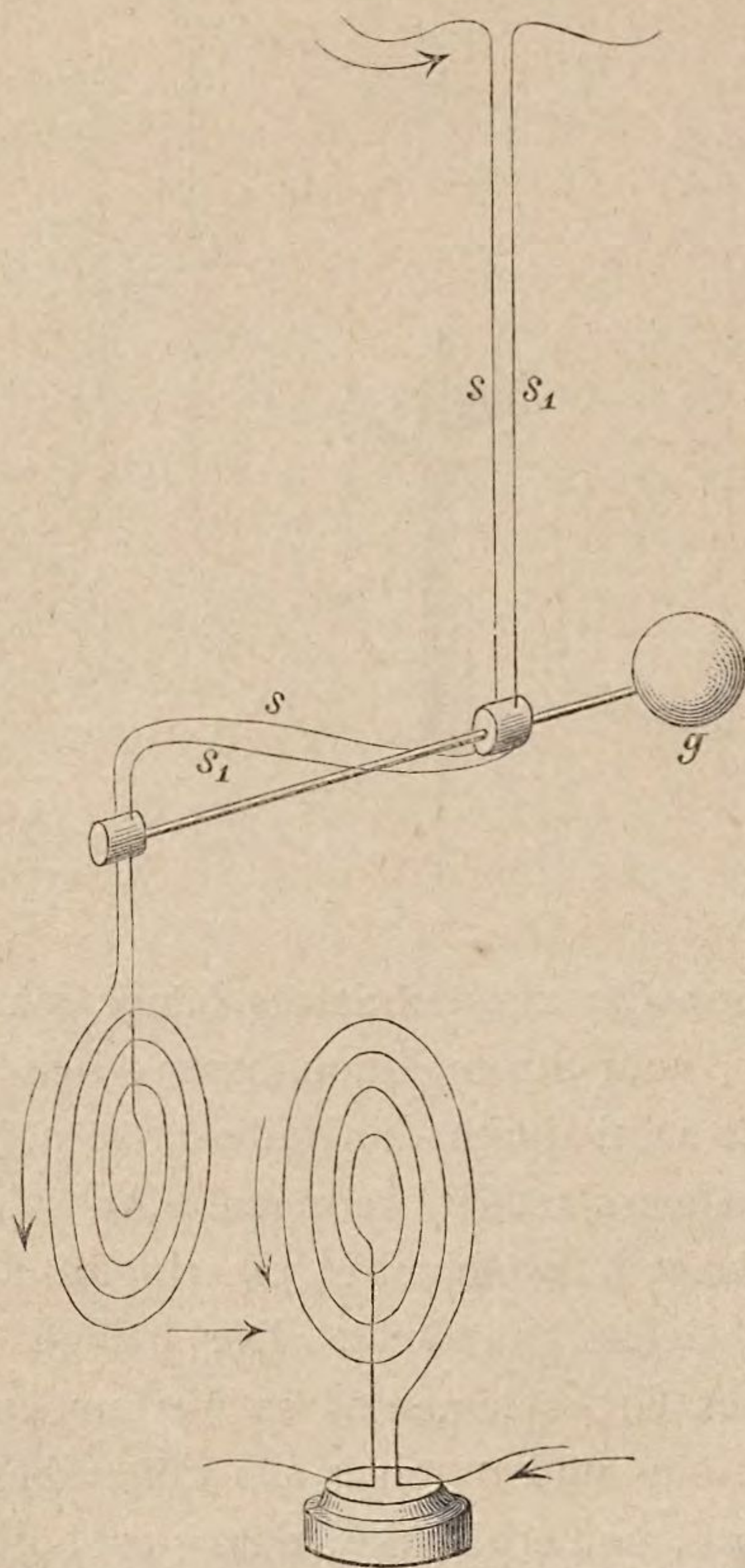
Zur Demonstration des zweiten Satzes hänge ich einen Aluminiumdraht so auf, dass er, vom Strom durchflossen, sich um eine verticale Axe drehen kann. Er wird durch die Nadelspitze a, welche in ein mit Quecksilber gefülltes Gefäss taucht, getragen. An seinem andern Ende trägt er einen Platindraht b, welcher in ein ringförmiges, ebenfalls mit Quecksilber gefülltes Gefäss eintaucht. Die beiden Gefässe sind mit den beiden Polen eines Groveelementes so verbunden, dass der Strom durch b in den Draht ein- und durch a aus demselben austritt. Sobald ich den Strom schliesse, bemerken Sie, dass der horizontale Theil des

*) Der Versuch gelingt nur dann, wenn die Quecksilberfläche völlig rein ist. Schon nach kurzer Zeit ist sie so oxydirt, dass keine Bewegung des Bügels mehr eintritt.

Drahtes sich von selbst in die Richtung von Westen nach Osten stellt. Wir wollen später über den Grund dieser Thatsache sprechen. Bringe ich jetzt einen verticalen Leitungsdraht, $m n$, der in der Richtung von oben nach unten von dem Strome eines andern Groveelementes durchflossen ist, in die Nähe der verticalen Leitertheile $d g$ oder $e f$, so wird der erstere, in dem der Strom von unten nach oben geht, abgestossen, der letztere dagegen angezogen. Die gleichgerichteten parallelen Ströme haben sich also angezogen, die entgegengerichteten abgestossen.

Je mehr Leitertheile aufeinander einwirken, desto kräftiger wird diese Anziehung oder Abstossung.

Fig. 38.



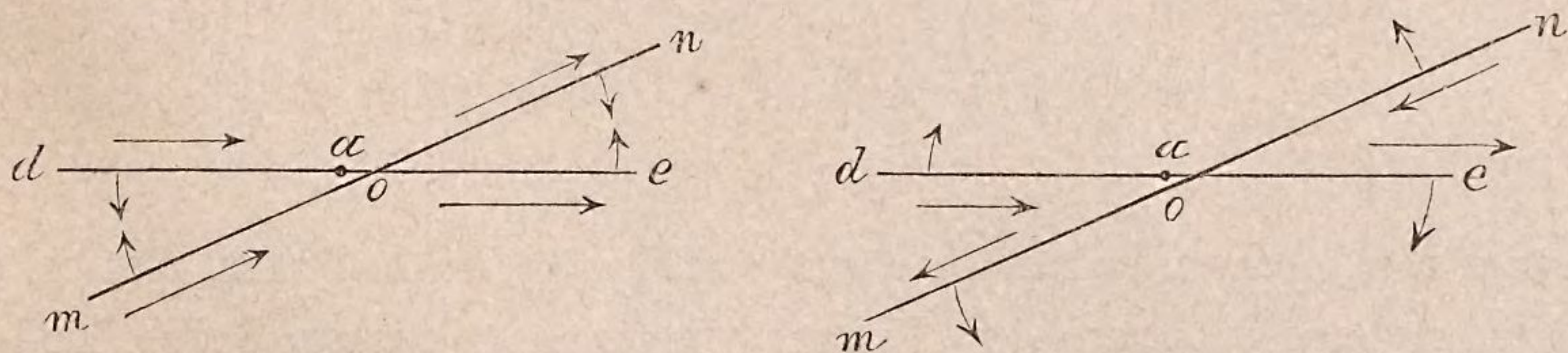
Ich habe einen Aluminiumdraht zu einer ebenen Spirale aufgerollt; an seine beiden Enden sind dünne Silberdrähte s und s_1 angelöthet, welche einen dünnen Ebonitstab und damit die Spirale und ein Gegen-

gewicht g tragen. Der Strom tritt durch die Bifilardrähte ein und aus. Nähere ich nun eine ähnlich gestaltete Kupferspirale, welche auch von einem Strom durchflossen ist, parallel der in verticaler Ebene hängenden Aluminiumspirale, so wird diese, je nach der Richtung der beiden Ströme, heftig angezogen oder abgestossen.

Ich hänge ferner einen schraubenförmig aufgerollten Kupferdraht an seinem oberen Ende fest auf, das untere lasse ich in ein Quecksilbergefäss tauchen. Ein Strom, welcher durch den ganzen Draht geführt wird, läuft in allen Windungen desselben in gleicher Richtung, je zwei Windungen ziehen sich also immer an, dadurch verkürzt sich die Spirale, hebt das untere Drahtende aus dem Quecksilber, der Strom ist also momentan unterbrochen, schliesst sich aber gleich wieder, wenn die Windungen sich nicht mehr anziehen, und so schliesst und öffnet der hüpfende Draht fortgesetzt den Strom.

Aus dieser gegenseitigen Einwirkung paralleler Ströme aufeinander folgt unmittelbar eine weitere Thatsache, welche für uns von besonderer Wichtigkeit ist. Bringe ich nämlich einen Stromleiter $m n$ so über oder

Fig. 39.



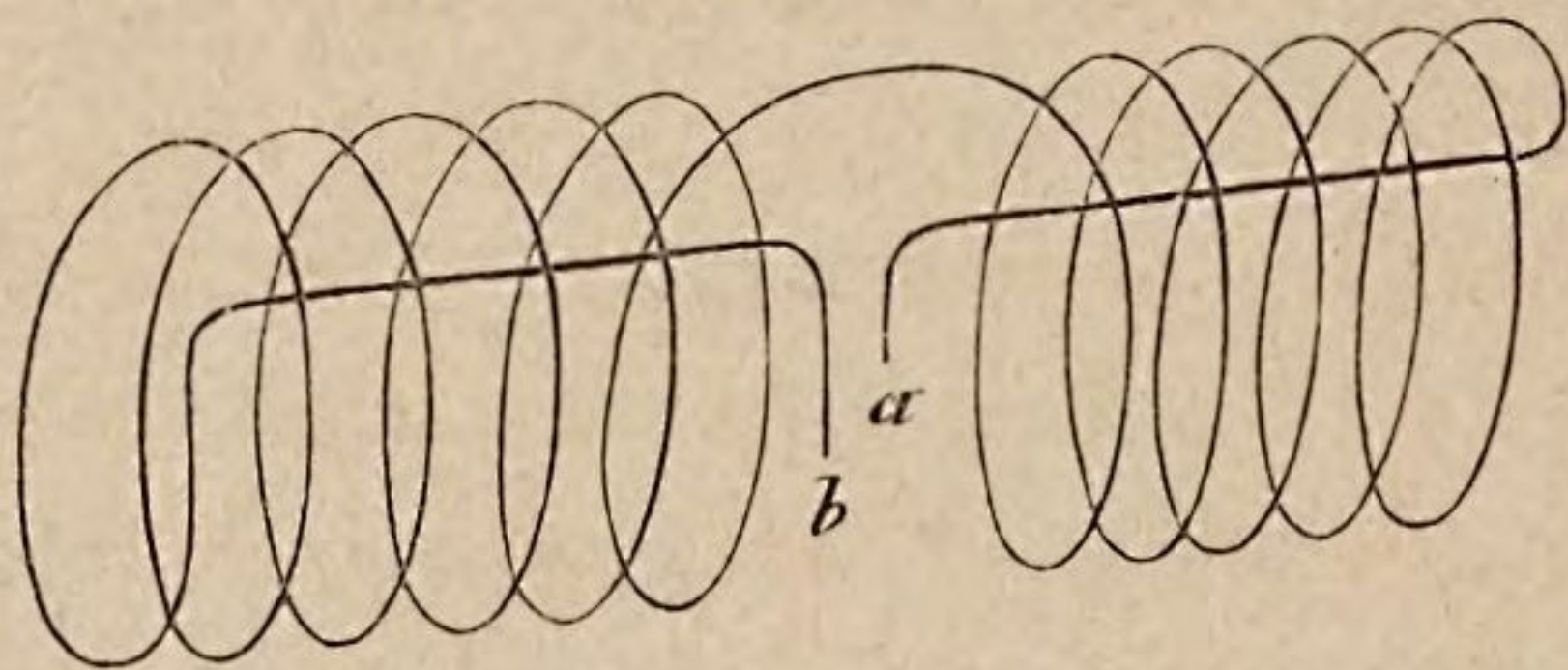
unter einem drehbaren Stromleiter, z. B. über dem horizontalen Theil $d e$ unseres Aluminiumdrahtes, der sich um die verticale Axe a drehen kann, an, dass beide Leiter einander kreuzen, so werden der Leitertheil $d o$ auf $m o$ und der Leitertheil $o n$ auf $o e$ je nach der Richtung der in ihnen fliessenden Ströme anziehend oder abstossend wirken, und zwar um so heftiger, je näher ihre Richtung dem Parallelismus kommt; anziehend, wenn in den Theilen $d o$ und $m o$ beide Ströme auf die Kreuzungsstelle o hin oder beide von o fortlaufen, abstossend, wenn der Strom in $d o$ auf o hin, in $m o$ von o fortläuft, oder umgekehrt. Das Resultat dieser Einwirkung wird sein, dass sich der Draht $d e$ solange um a dreht, bis $d e$ und $m n$ einander parallel und die in ihnen fliessenden Ströme einander gleichlaufend sind.

Dem vollständigen Zustandekommen dieses Versuchs widersetzt

sich nun aber der Draht *d e* dadurch, dass er an sich das Bestreben hat, sich von Westen nach Osten zu richten. Wir dürfen deshalb nur sagen: er hat das Bestreben, sich dem Drahte *m n* parallel zu stellen, in der That wird er sich immer in die Resultirende aus den beiden Stellungen, welche er gleichzeitig annehmen soll, stellen. Als Grund der Thatsache aber, dass ein jeder um eine Verticalaxe drehbarer Leitungsdraht eine bestimmte Richtkraft hat, müssen wir annehmen, dass die Erde selbst in der Richtung von West nach Ost von electricen Strömen umkreist sei, welche jeden anderen Stromleiter ihrer eigenen Richtung parallel zu stellen streben.

Ich kann weiter an die Stelle des Drahtbügels *d e f g* ein System solcher Bügel stellen, welche unter sich verbunden sind. Wir nennen ein System von Strömen, deren Ebenen auf ein und derselben Linie senkrecht stehen, ein *Solenoid*. Ein solches System kann ich bequem

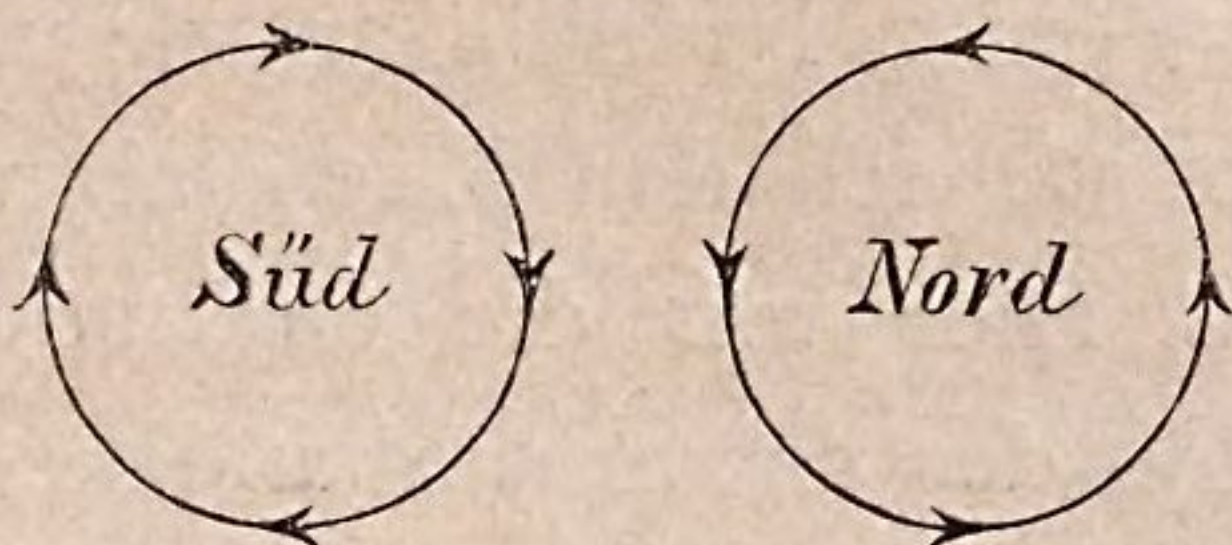
Fig. 40.



ersetzen durch einen schraubenförmig aufgewundenen Draht, dessen Windungen nahezu in parallelen Ebenen liegen und dessen beide Enden *a* und *b* ganz wie vorher dazu dienen, einen Strom so durch die Drahtspirale zu leiten, dass sich dieselbe als Ganzes wieder um die Axe *a* drehen kann. Wieder wird eine jede Drahtwindung sich in die Westostrichtung stellen, die Axe des Solenoids also in die Südrichtung, wieder wird ein horizontal über dasselbe hingeführter Strom eine jede Windung sich selbst parallel, die Solenoidaxe also senkrecht zu sich zu stellen streben und wenn ich nun ein zweites solches Solenoid, das ebenfalls von einem Strom durchflossen wird, dem drehbaren nähere, so werden wieder die Theile der Windungen, in denen die Ströme gleiche Richtung haben, einander anziehen, die, in denen sie entgegengesetzte Richtung haben, einander abstossen. Da die Axe des Solenoids eine bestimmte Stellung gegen die Weltgegenden annimmt, so können wir dasjenige seiner Enden, welches nach Norden zeigt, seinen Nordpol, das andere seinen Südpol nennen, und wenn ich nun den Nordpol des Solenoids,

welches ich in der Hand halte, dem Nordpole des drehbaren Solenöids nähere, so wird derselbe abgestossen, der Südpol aber wird vom Nordpole angezogen. Es ist leicht, an einem Solenöid zu erkennen, welcher Pol nach Norden zeigen muss; wenn wir das eine Ende des Solenöids auf uns hinrichten, so ist es dann ein Südpol, wenn der Strom an ihm kreist

Fig. 41.

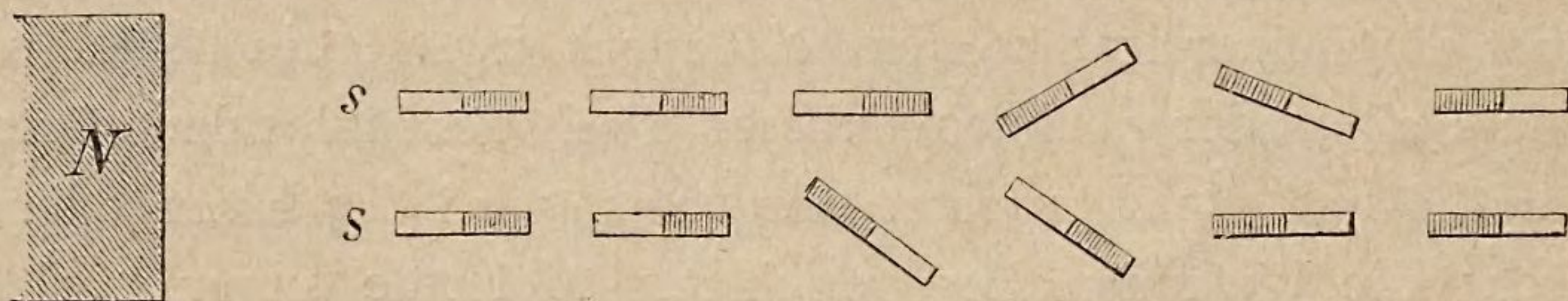


in der Richtung, in welcher die Zeiger einer Uhr fortschreiten, im entgegengesetzten Falle ist es ein Nordpol.

Ihnen ist schon die Analogie aufgefallen, welche zwischen dem Verhalten eines Solenöids und eines *Magnets* herrscht. Auch der Magnet richtet seine Axe von Nord nach Süd, auch seine gleichnamigen Pole stossen sich ab, seine ungleichnamigen ziehen sich an. Ich kann in unseren Versuchen eins der Solenöide durch einen Magnet ersetzen, die gleichnamigen Pole des Magnets und Solenöids wirken aufeinander wie zwei gleichnamige Solenöid- oder wie zwei gleichnamige Magnetpole. Die blosse Drahtspirale ist ohne alle Wirkung auf eine Magnetnadel, sowie ich aber einen Strom durch sie hindurchleite, verhält sie sich wie ein Magnet, sie zieht den einen Nadelpol an und stösst den andern ab. Ich wiederhole diesen Versuch, nachdem ich einen Stab von weichem (ausgeglühtem) Eisen in die Spirale geschoben habe. Schliesse ich jetzt den Strom, so zeigt sich der Eisenstab in hohem Grade magnetisch, er zieht Eisenstücke an, wir haben einen *Electromagnet* hergestellt. Den Vorgang, welcher hierbei stattgefunden hat, denken wir uns so: Alles Eisen oder Stahl besteht aus Molecülen, deren jedes von einem in sich geschlossenen Strome umgeben ist. Diese Molecüle liegen aber ungeordnet durcheinander; werden sie durch irgend ein Mittel so geordnet, dass alle, oder doch ein grosser Theil der Molecularströme einander parallel und gleichgerichtet werden, so wird das Eisen oder Stahl magnetisch; die Wirkung aller gerichteten Molecüle summirt sich so, dass der ganze Körper polaren Magnetismus annimmt; man kann ihn dann als einen von parallelen und gleichlaufenden electrischen Strömen umgebenen Stab betrachten. Hört die Ordnung unter den Molecülen

wieder auf, so wird der Körper wieder unmagnetisch. Im weichen Eisen ordnen sich die Molecüle leicht, die Ordnung ist aber auch leicht wieder aufzuheben. Im Stahl ordnen sich die Molecüle schwer, behalten aber ihre Ordnung dauernd bei, wir schreiben deshalb dem Stahl eine *Coërcitivkraft* zu, die das Eisen nicht besitzt. Lege ich einen weichen Eisenstab an einen Magnetpol, so wird er gleich durch und durch magnetisirt, sein entferntes Ende zieht wiederum Eisen an. Dabei wird das Stabende, welches ich an einen Nordpol angelegt habe, ein Südpol, das andere ein Nordpol. Reisse ich den Eisenstab vom Magnet ab, so ist er völlig unmagnetisch. Hier war die Ordnung der Molecularströme durch die Molecularströme des schon vorhandenen Magnets erfolgt, weil gekreuzte Ströme das Bestreben haben, sich parallel und gleich gerichtet zu stellen. Als ich den Eisenstab in das Solenoid steckte, richteten sich die Molecularströme nach demselben Princip durch die den Stab umkreisenden Ströme und wenn ich nun den Eisenstab einfach in die Nordsüdrichtung halte, so dass er von den Strömen, welche die Erde in der Richtung von West nach Ost umgeben, umkreist wird, so nimmt er einen *Magnetismus der Lage* an, er erhält an dem nach Norden gerichteten Ende einen Nordpol. Die ganze Erde ist in Folge der sie umkreisenden Ströme als ein Magnet zu betrachten. Ein in seinem Schwerpunkt aufgehängter Magnet nimmt unter dem Einflusse dieses Erdmagnetismus zunächst die Nordsüdlage an, ausserdem aber senkt sich auf der nördlichen Halbkugel sein Nordpol, auf der südlichen sein Südpol und wir können an dieser geneigten Stellung eines so aufgehängten Magnets (seiner Inclination) die Richtung erkennen, in welcher der gesammte Magnetismus der Erde auf die Nadel wirkt. In diese Inclinationsrichtung gebracht nimmt auch der weiche Eisenstab seinen grössten Magnetismus der Lage an. Sobald ich die Kräfte, welche hier die Molecularströme gerichtet haben, verschwinden lasse, ist das Eisen wieder unmagnetisch.

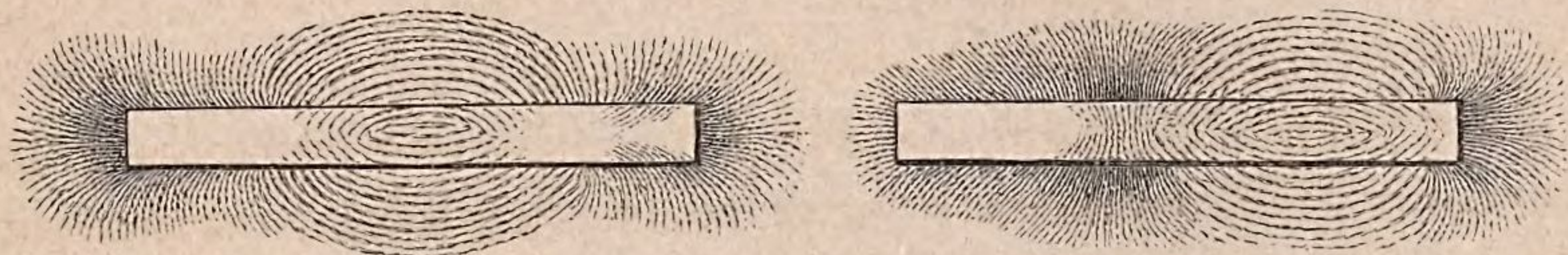
Fig. 42.



Anders wie das Eisen verhält sich der Stahl. Nur mühsam geht die Ordnung seiner Molecüle vor sich. Ich habe hier eine Doppelreihe kleiner

Magnete; sie sollen Magnetmolecüle darstellen, sie stehen ungeordnet. Ich nähere dem einen Ende der Doppelreihe einen starken Magnetpol, und ein Magnet nach dem andern richtet sich, aber nur bis zu einer gewissen Entfernung vom Magnetpol. Denken Sie ebenso einen Stahlstab mit schwerbeweglichen Molecülen an den Magnetpol herangebracht. Auch hier beginnt das Ordnen, aber es dringt nicht durch den ganzen Stab, dicht am Magnetpol erhält der Stab wohl den entgegengesetzten Magnetismus, sein zweiter Pol aber liegt nicht an seinem Ende, sondern irgend wo in ihm, er hat einen *Folgepunkt* erhalten und ist als Magnet unbrauchbar. Ich lege auf unseren so behandelten Stahlstab ein Papier und streue Eisenfeile darauf;

Fig. 43.



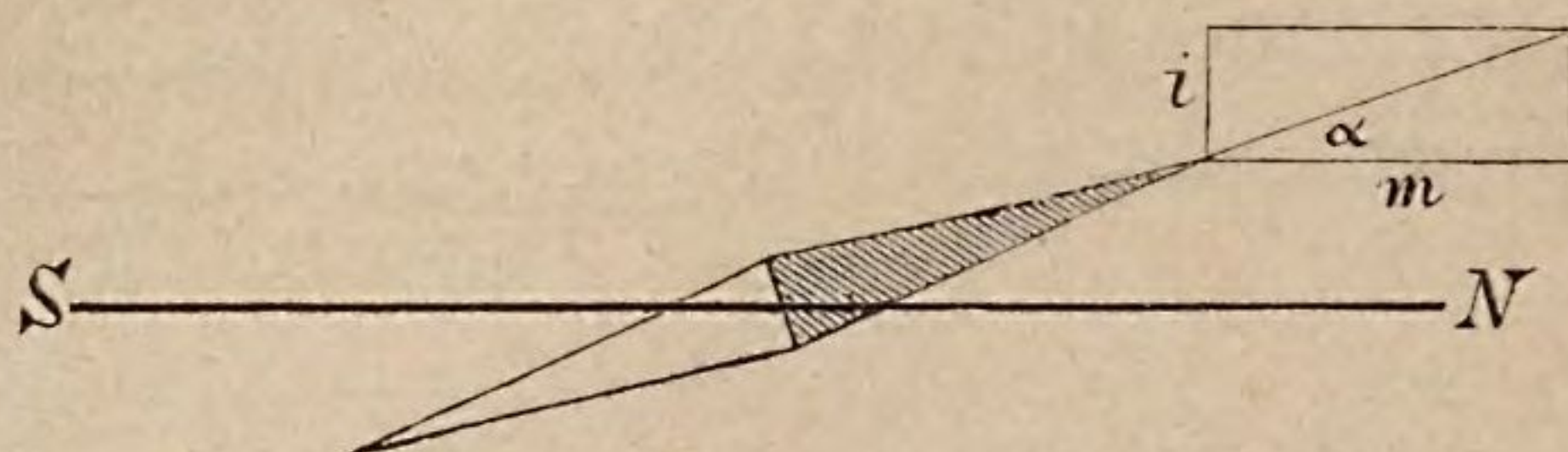
Sie sehen, wie sie sich um das eine Ende richtig ordnet, das zweite Ordnungscentrum aber liegt nicht am Ende, sondern an einer früheren Stelle des Stabes, während es an einem richtig ausgebildeten Magnet am Ende liegen muss. Um solches Durchmagnetisiren des trägen Stahles zu erhalten, streicht man ihn mit einem Magnet. Mache ich das an meinem Modell nach, so sehen Sie, wie Molecül für Molecül sich dem streichenden Pole zuwendet, sich bei dessen Fortbewegung umkehrt und in der Stellung, die ihm so angewiesen ist, stehen bleibt. Der Pol des Stabes, an dem das Streichen aufhört, ist deshalb ungleichnamig mit dem streichenden Pole des gegebenen Magnets.

Diese ganze Anschauung beruht auf einer von Ampère aufgestellten Hypothese. Es ist leicht zu zeigen, dass wir uns ein Magnetisiren in analoger Art, wie ein Electrisiren durch Influenz nicht denken können. Wenn ich einen Stab durch einen angenäherten electrischen Körper durch Influenz electrisire, so kann ich ihn nachher in zwei Stücke zerlegen, deren eines positiv, das andere negativ ist; nicht so einen Magnet. Ich magnetisire einen Stahlstab durch Bestreichen mit einem Magnet. Er hat jetzt einen positiven und einen negativen Pol. Ich breche ihn in der Mitte durch, und jede Hälfte hat ihren positiven und ihren negativen Pol, ganz wie es nach der Vorstellung vom Ordnen der Molecularströme zu erwarten war.

Kehren wir nun wieder zurück zu der Einwirkung eines Strom-

leiters auf ein drehbares Solenöid oder eine drehbare Magnetnadel, deren Drehaxe wir ein- für allemal als vertical annehmen wollen. Das Solenöid und, nach Örsted's Entdeckung, auch der Magnet hat das Bestreben, sich so zu stellen, dass seine Längsaxe senkrecht auf der Richtung des ihn kreuzenden Stromes steht. Da diese Längsaxe aber ausserdem noch das Bestreben hat, sich von Norden nach Süden zu richten, so stellt

Fig. 44.

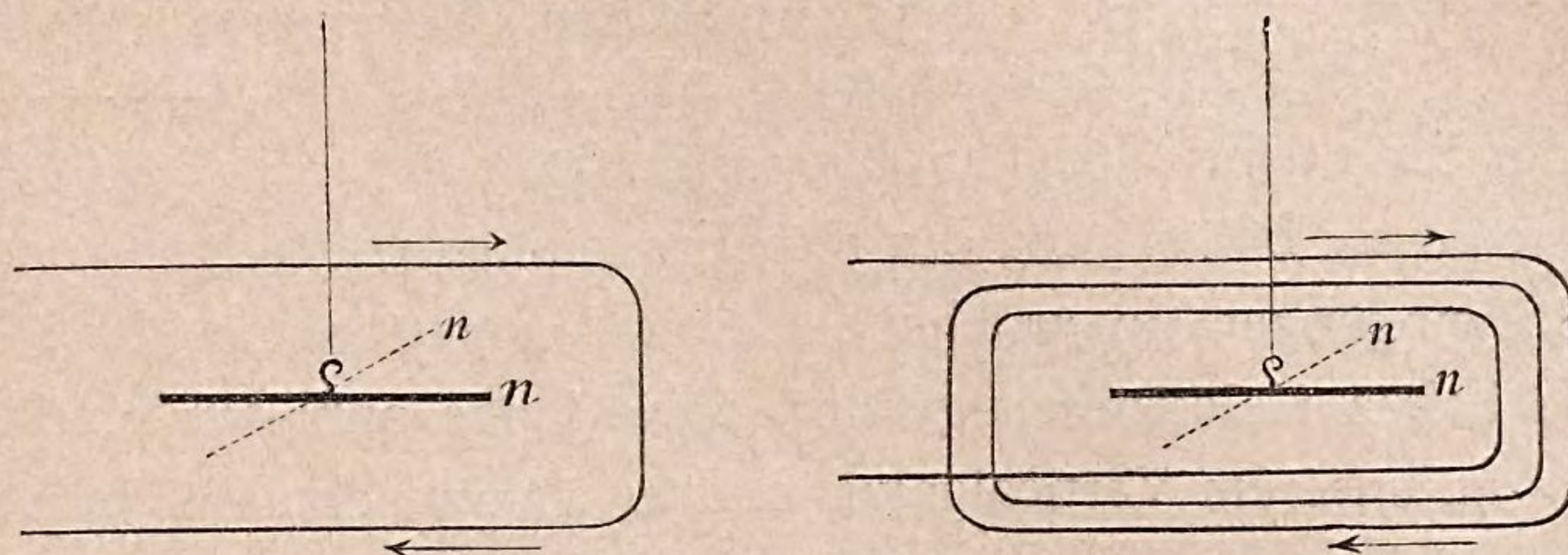


sie sich in die Resultirende aus den beiden sie richtenden Kräften, nämlich der von Osten nach Westen richtenden Kraft i des im Leitungsdrahte SN vorhandenen Stromes und der nach Norden wirkenden magnetischen Erdkraft m . Der Winkel α , um welchen die Nadel von der Nordsüdrichtung abweicht, wird um so grösser sein, je grösser bei gleichbleibendem m die ablenkende Kraft der Stromstärke S ist und das Verhältniss $\frac{i}{m}$, oder die Tangente des Ablenkungswinkels α , ist unmittelbar ein Maass für die Stärke des Stromes S . Darum heisst ein solcher aus einer Magnetnadel und einem von Norden nach Süden gerichteten Stromleiter zusammengesetzter Apparat ein *Galvanometer* oder eine *Tangentenbussole*. Wir haben uns bisher meist verticaler Galvanometer bedient; bei ihnen vertritt die stärkere Belastung der unteren Nadelhälfte die Stelle der magnetischen Richtkraft, während der ablenkende Strom statt von Westen nach Osten von rechts nach links wirkt, oder umgekehrt.

Der Strom wird im Galvanometer nicht einfach über der Nadel hingeführt, sondern er umkreist sie so, dass er einmal über dieselbe hin-, das andere mal unter ihr zurück geht; beide Theile des Stromes wirken in ganz gleichem Sinne ablenkend auf die Nadel; aus den vorher angestellten Versuchen folgt nämlich der Satz, dass, wenn wir uns mit dem Strome im Leiter schwimmend und den Drehpunkt der Nadel anblickend denken, der Nordpol der Nadel nach unserer Linken abgelenkt wird und daraus ersieht man sofort, dass sich die Wirkungen des oberen und des unteren Drahtes auf die Nadel zu einander addiren

müssen. Dasselbe geschieht, wenn der Draht wiederholt über und unter der Nadel hingeführt wird, und so erhalten wir den von Poggendorff und von Schweigger gleichzeitig erfundenen *Multiplicator*, eine Anzahl von Drahtwindungen, mit deren Zahl die Wirkung des Stromes auf die

Fig. 45.



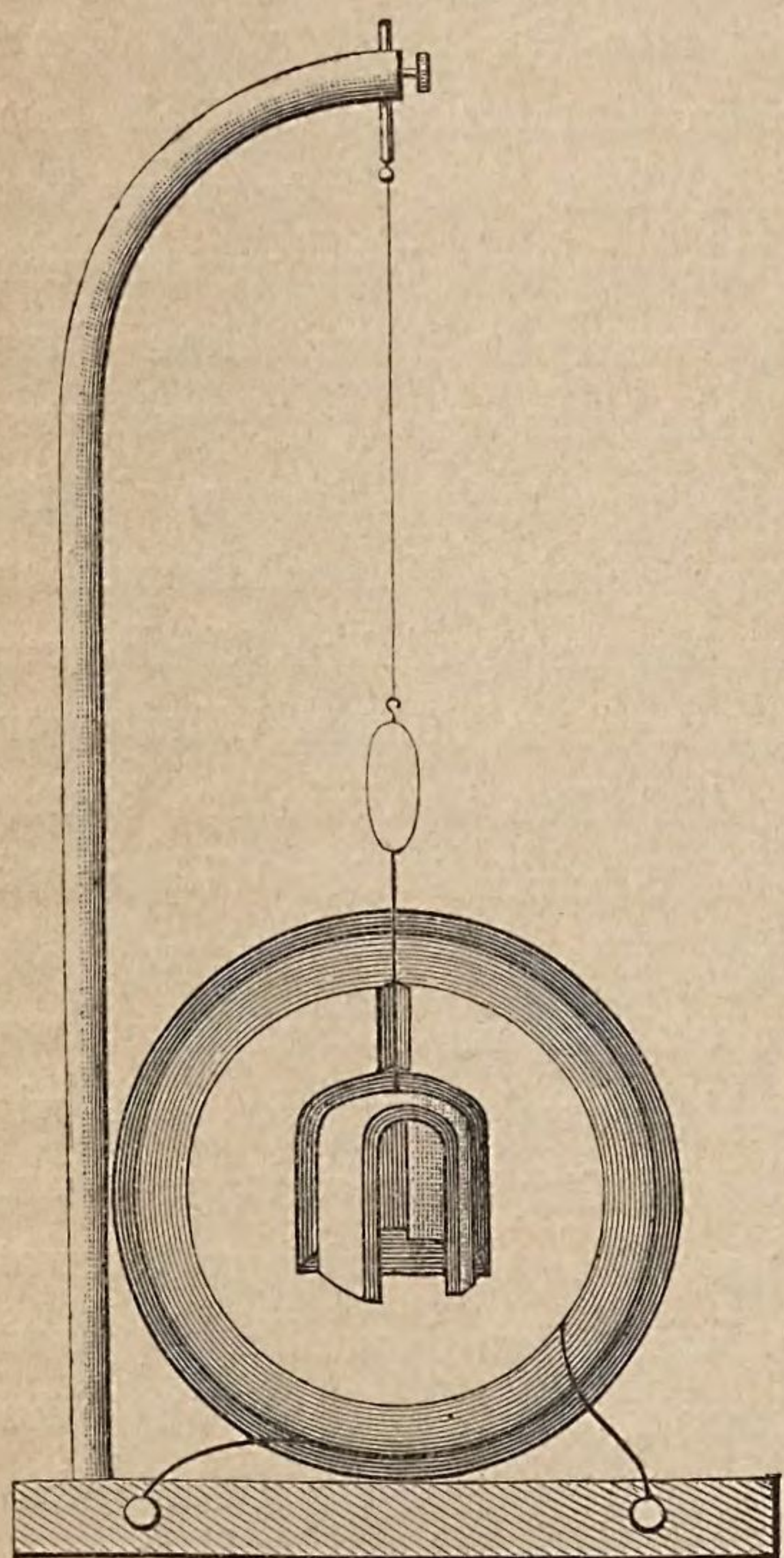
Nadel immerfort wächst, selbstverständlich unter der Voraussetzung, dass die Stärke des Stromes dadurch nicht geändert wird. Aber je mehr Drahtwindungen wir anwenden, je länger also der Draht wird, desto mehr Widerstand schalten wir in den Strom ein, um so mehr, als man sehr lange Drähte nicht sehr dick wählen darf. Die Anwendung von Multiplikatoren mit vielen Windungen ist deshalb eine beschränkte, man wird sie nur dann anwenden, wenn der zu messende Strom schon einen sehr grossen Widerstand in sich enthält, nicht aber im entgegengesetzten Falle; hier würde die Abschwächung des Stromes mehr schaden, als die Multiplication der Wirkung nützt. Bei physiologischen Versuchen machen wir deshalb den Unterschied zwischen dem mit wenig dicken Windungen versehenen Muskelmultiplikator, und dem mit vielen dünnen Windungen versehenen Nervenmultiplikator; ein jeder derselben ist dann am besten angebracht, wenn in dem zu beobachtenden Stromkreis der Widerstand ebensogross ist, wie der des Multiplikators. Die meisten neueren Multiplikatordrähte sind in 2 oder 4 Strecken zerlegt; man kann dieselben für verschiedene Zwecke wieder so verschiedenartig koppeln, wie wir die Elemente durch Pachytrope in verschiedene Gruppen vereinigt haben.

Von den verschiedenen Einrichtungen, welche unser wichtiger Apparat erhalten hat, muss ich einige hervorheben. Um durch denselben Apparat schwache und starke Ströme messen zu können, brauchen wir nur dem Multiplikator verschiedene Entfernungen vom Magnet zu geben. Man zerlegt ihn dazu gern in zwei Hälften, mit dem Multiplikator Draht umwickelte Holzringe, welche man auf einem Schlitten auseinander rücken kann. Das ist der Vorzug der Wiedemann'schen Galvanometer. Will

man die Empfindlichkeit des Galvanometers weiter erhöhen, so muss man die Richtkraft m abschwächen. Das geschieht durch Astasirung des Magnets, entweder indem man ihn fest mit einem zweiten, über dem Multiplicator angebrachten und entgegengesetzt gerichteten Magnet von gleicher Stärke verbindet, oder indem man seinem Nordpol den Nordpol eines andern Magnets von aussen her gegenüberstellt. Wäre durch eines dieser Mittel die Richtkraft m ganz aufgehoben, so würde auch der schwächste Strom die Nadel um 90° ablenken.

Eine grosse Belästigung des Experimentators entsteht aus den fortgesetzten Schwingungen, in welche die einmal angestossene Nadel versetzt wird; Sie haben Gelegenheit gehabt, diese lange anhaltenden Pendelbewegungen an unserem Verticalgalvanometer wahrzunehmen. Jede Schwingung wird kleiner als die vorhergehende, aber erst nach langer Zeit wird

Fig. 46.



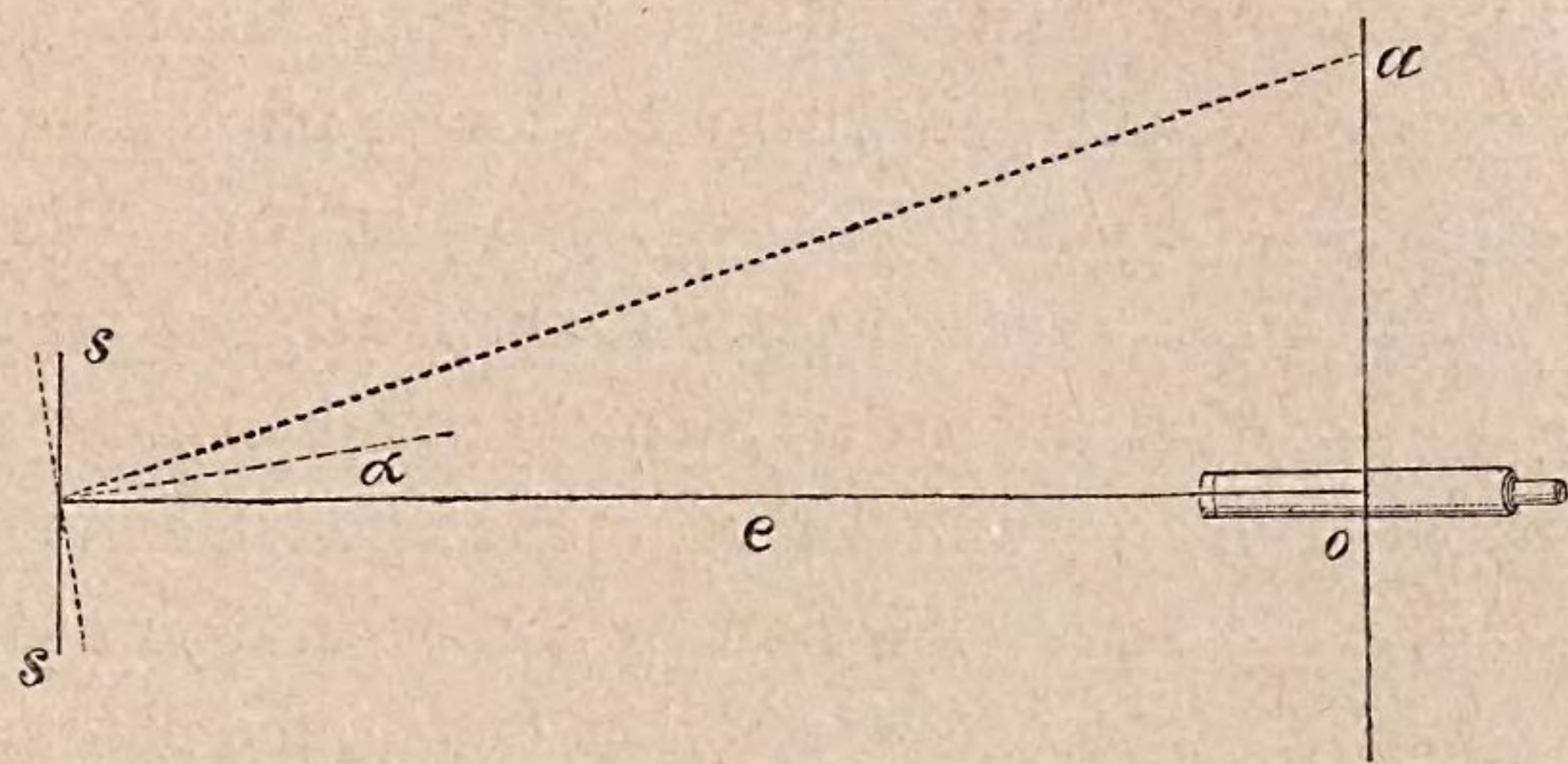
die Ruhelage erreicht. Diesem Uebelstand hilft die *Dämpfung* ab. Ich werde in meinem letzten Vortrage Gelegenheit haben, Ihnen zu zeigen, weshalb ein Magnet in der Nähe dicker Metallmassen viel rascher zur Ruhe kommt, weshalb seine Schwingungen durch deren Nähe gedämpft werden. Benutzen wir jetzt nur die Thatsache. Die Magnetnadel bekommt die Form eines an einem dünnen Faden hängenden magnetisirten Ringes, welcher sich nur knapp in der kugligen Ausbohrung einer dicken Kupferhülse bewegen kann. Seine Schwingungen nehmen sehr schnell ab; die Dämpfung kann aber zu einer vollkommenen gemacht werden, wenn man gleichzeitig den Magnet durch Annäherung eines andern Magnets astasirt; der Magnet des Galvanometers geht dann ohne alle Schwingungen ruhig auf seinen Nullpunkt zurück, es tritt der von du Bois-Reymond zuerst hergestellte *aperiodische*

Zustand der Magnete ein, den wir auch ohne Astasirung erreichen können, wenn wir mit Siemens einen hufeisen- oder glockenförmigen Magnet in die

Kupferhülse hängen. An unserem Spiegelgalvanometer, welches einen solchen Glockenmagnet enthält, haben Sie diesen vollkommenen aperiodischen Zustand schon bewundern können und es bleibt mir nur noch zu sagen übrig, welche Bewandtniss es mit dem Spiegel des Galvanometers hat.

Wir könnten, um die Stromstärke zu messen, den Ablenkungswinkel der Nadel an einer Kreistheilung beobachten und seine trigonometrische Tangente aufsuchen. Die von Poggendorff eingeführte Spiegelablesung überhebt uns dieser Mühe und macht zugleich die Ablesung kleinster Stromstärken möglich. Der Magnet des Galvanometers trägt

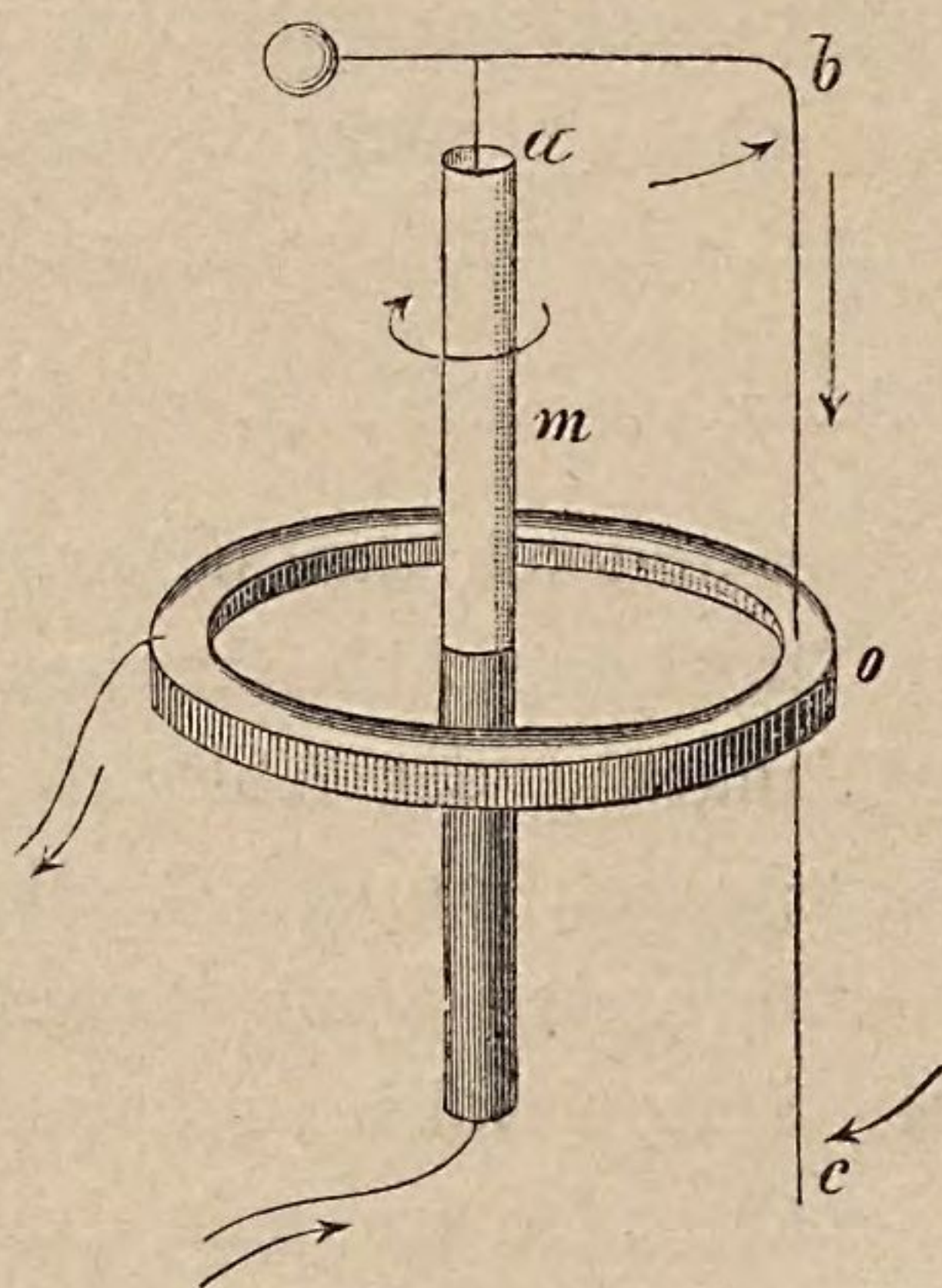
Fig. 47.



einen verticalen Spiegel s . Ich sehe mittelst eines horizontalen Fernrohrs senkrecht auf diesen Spiegel und erblicke darin das Bild einer ebenfalls horizontalen Scala, welche über dem Fernrohr angebracht ist, und zwar sehe ich den Nullpunkt derselben. Dreht sich der Spiegel um einen kleinen Winkel α , so sehe ich nicht mehr den Scalennullpunkt gespiegelt, sondern den a ten Theilpunkt, der um die Länge a von o absteht. Nenne ich e den Abstand der Scala vom Spiegel, so ist $\frac{a}{e}$ wieder die trigonometrische Tangente von 2α und ich darf daher, wenn die Entfernung e immer beibehalten wird, für kleine Ablenkungen das Stück a ganz unmittelbar als Maass der Tangente der Ablenkung, also als Maass der Stromstärke nehmen. Bringe ich an die Stelle des Fernrohrs einen durch eine Lampe hell erleuchteten Spalt, lasse die Strahlen, die von diesem ausgehen, auf den Spiegel fallen und auf die an die Stelle der Scala gestellte Wand reflectiren, so wandert das Bild des Spaltes, das ich durch eine Linse schärfer begrenzt habe, mit der Magnetablenkung auf der Wand hin und her und ich kann die Angaben des Galvanometers objectiv sichtbar machen. Unsere grelle Beleuchtung mit der Knallgaslampe erlaubt das sogar, ohne den Saal zu verfinstern.

Aber so exact unsere Messungen nun auch sein mögen, sie sind nicht absolut, sondern noch immer von dem jedesmal angewandten Apparate abhängig. Die Richtkraft i ist nicht die Stromstärke S selbst, sondern nur ihr proportional, denn sie ist beeinflusst durch die Gestalt, Lage und Windungszahl des Multiplicators. Durch Vergleich der Angaben eines Galvanometers mit der durch denselben Strom in einem Voltmeter hervorgebrachten electrolytischen Ausscheidung, etwa mit der Masse des in einer Minute niedergeschlagenen Silbers, kann man das Galvanometer sehr gut aichen oder seinen *Reductionsfactor* bestimmen; seine Angaben werden dadurch einem Jeden verständlich, während die blosse Thatsache, dass eine Galvanometernadel um so und so viele Grade abgewichen ist, für Niemand ein Interesse haben kann. Trägt man aber der Gestalt und den Dimensionen des Multiplicators Rechnung, nimmt man statt seiner einen einfachen, grossen Ring, dessen Radius gemessen ist, drückt man die erdmagnetische Richtkraft auch in absolutem Maasse aus, so wird auch der Strom nach *absolutem magnetischen Maasse* gemessen und man kann jedem beliebigen Galvanometer eine Eintheilung nach diesem Maasse geben, wenn man seine Angaben mit denen eines solchen absoluten Galvanometers vergleicht. Der Strom $\mathfrak{r}$ ist in dieser Einheit so stark, dass er in $\mathfrak{r}$ Minute 6,7 mgr Silber ausscheidet und fast genau $\mathfrak{r}$ Cub.-Cent. Knallgas entwickelt.

Fig. 48.



Wir haben uns bei allen den Betrachtungen, welche uns auf das Galvanometer geführt haben, den Magnet um eine gegen seine Längsrichtung senkrechte Axe drehbar gedacht. Sehen wir uns noch den

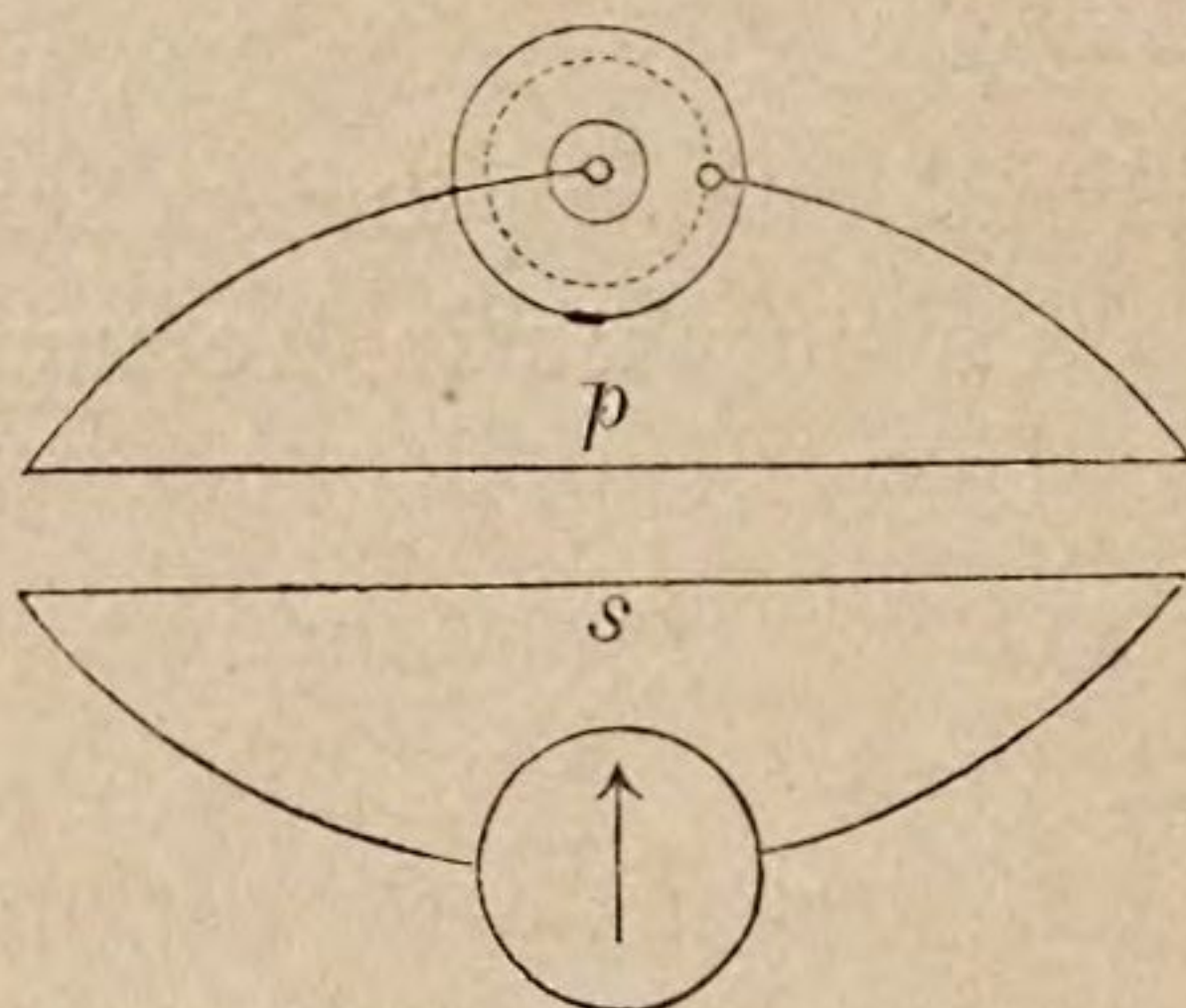
Fall an, dass ein Leitungsdraht um einen Magnet oder ein Magnet um einen Leitungsdraht rotiren kann, so dass die Längsrichtungen beider stets einander parallel bleiben. Ich habe hier einen Magnet *m* vertical aufgestellt, der Leitungsdraht *bo* kann sich um eine verticale Axe drehen, welche in ein Quecksilbernäpfchen *a* taucht. Durch dieses tritt der Strom ein, durch die mit Quecksilber gefüllte Rinne, in welche das andere Ende von *bo* taucht, tritt er aus. Der Strom in *bo* will sich den Strömen des Magnets parallel und gleichgerichtet stellen. Denken wir uns das eintauchende Ende des Drahtes *o* festgehalten, so würde eine bei *b* in der Richtung des Pfeiles angreifende Kraft eine solche Ablenkung des Drahtes aus den Verticalen hervorbringen. Da aber durch die Aufhängung in *a* diese Ablenkung unmöglich gemacht ist, so dreht die auf *b* wirkende Kraft den ganzen Draht parallel mit sich selbst in der den Magnetströmen entgegengesetzten Richtung um die Längsaxe des Magnets. Der Leiter *bo* darf aber für diesen Zweck nur unter der Einwirkung der einen Magnethälfte stehen, denken wir ihn über *o* hinaus verlängert, so würde an seinem unteren Ende *c* eine Kraft in entgegengesetzter Richtung angreifen und die in *b* und *c* wirkenden Kräfte würden sich aufheben. Es ist leicht, die eben angestellte Betrachtung auf einen zweiten Apparat, den ich Ihnen ebenfalls hier zeige, zu übertragen, in welchem der Leiter festgestellt ist, und ein Magnet sich um denselben dreht. In beiden Apparaten ändert sich die Drehungsrichtung, sobald ich die Richtung des Stromes in *bo* umkehre.

NEUNTER VORTRAG.

Meine Herren!

Den letzten Gegenstand unserer Betrachtung bildet die Lehre von den *Inductionsströmen*. Auch diese wollen wir an der Hand des Experimentes, von den einfachsten Grunderscheinungen ausgehend, kennen lernen.

Fig. 49.

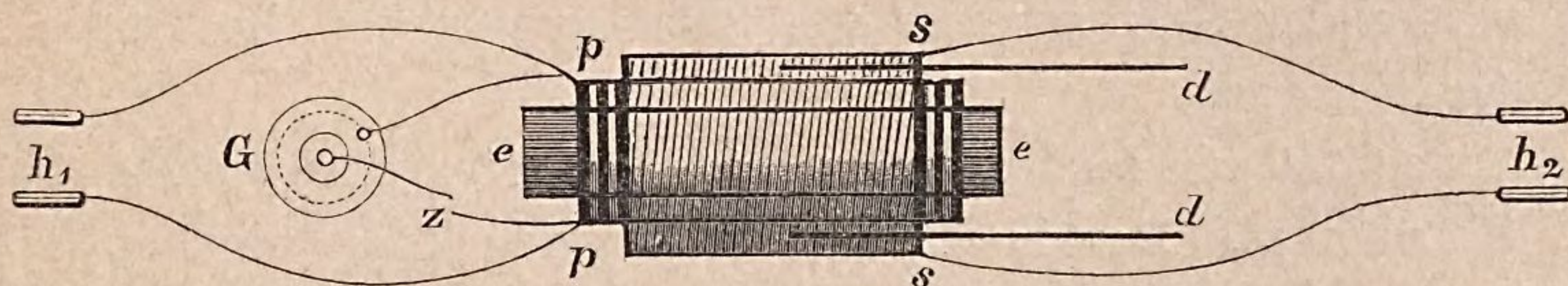


Zwei Stromleiter, p und s, liegen in einer Ebene einander parallel. In die Leitung p ist ein galvanisches Element, in s ein Galvanometer eingeschaltet. In dem Augenblick, in welchem in p der Strom geschlossen wird, entsteht auch in s ein Strom, welcher dem ersten entgegengesetzt gerichtet ist und nur so lange dauert, wie die Operation der Schliessung des Stromes in p; momentan pflegen wir das zu nennen. Wird der Strom in p geöffnet, so entsteht abermals ein momentaner Strom in s, der aber diesmal dem Strom in p gleichgerichtet ist. Wir nennen den von der Electricitätsquelle ausgehenden Strom den inducirenden, den primären oder Hauptstrom, die in s entstehenden Ströme heissen inducirte

oder Inductionsströme oder auch secundäre Ströme, und zwar heisst der durch Schliessung von p in s entstandene der Schliessungsstrom, der durch Oeffnung von p in s entstandene der Oeffnungsstrom. Statt den Strom in p zu öffnen und zu schliessen, kann man auch einen constant durch p laufenden Strom von s entfernen oder ihn aus der Ferne an s heranbringen. Die Entfernung wirkt ganz wie Oeffnung, die Näherung wie Schliessung des primären Stromes und wir nennen deshalb die hierdurch inducirten secundären Ströme ebenfalls Oeffnungs- und Schliessungsströme.

Die besprochenen Erscheinungen sind zu schwach, um sie in dieser einfachen Gestalt vorzuzeigen. Wenn wir aber wieder an Stelle eines jeden Drahtes einen Multiplicator anwenden, wenn wir jeden der Drähte zu einer *Inductionsspirale* schraubenförmig aufrollen, so können wir alles Gesagte am Spiegelgalvanometer bestätigen. Von den beiden Spiralen,

Fig. 50.



welche ich ineinander schiebe, soll die innere immer als primäre, $p p$, die äussere als secundäre, $s s$, angewandt werden. Ich schalte in die primäre Leitung ein Groveelement G und einen Stromschlüssel z in die secundäre die Leitung des Spiegelgalvanometers (in der Figur ersetzt durch ein paar Handhaben h_2) ein. Nun schliesse ich den Strom; das Bild des Spaltes weicht auf dem Schirm aus der Gleichgewichtslage, kehrt aber sofort in dieselbe zurück. Ich öffne den Strom, das Bild weicht wieder aus, aber nach der andern Seite. Ich schliesse den Strom dauernd und ziehe die primäre Spirale aus der secundären heraus, die Ablenkung des Bildes zeigt uns einen Oeffnungsstrom an, ich stecke endlich die primäre Spirale wieder in die secundäre, und erhalte den Schliessungsstrom.

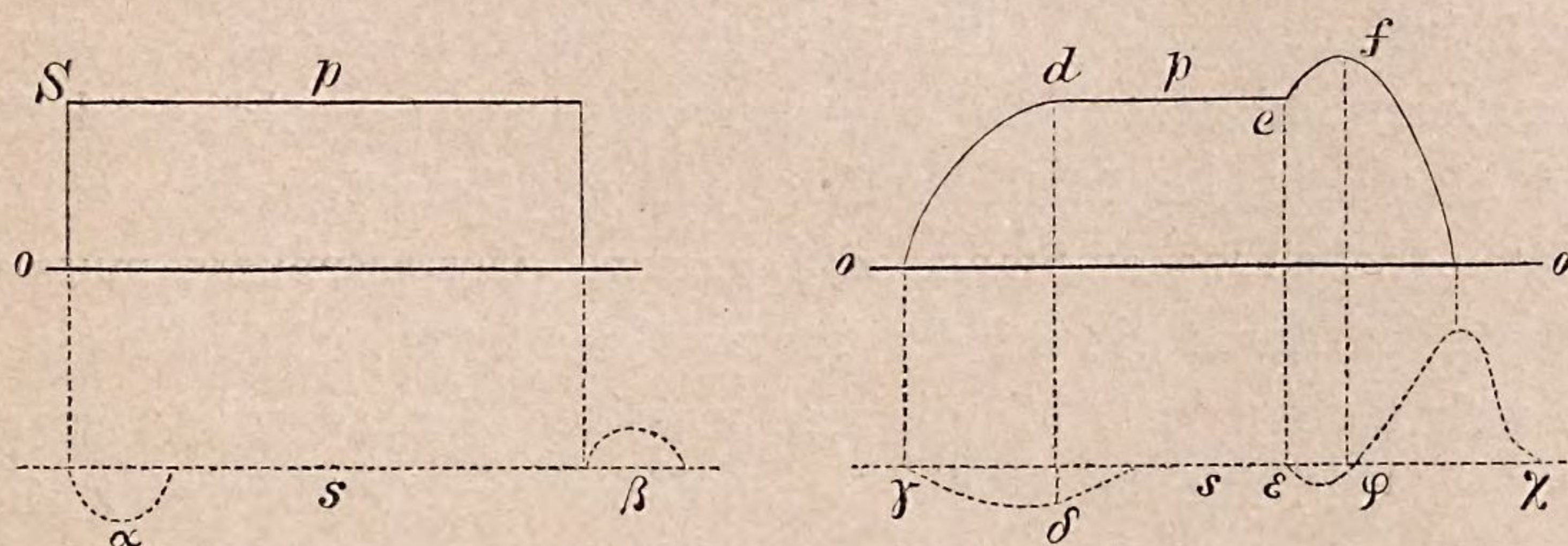
Ich will in dieser Reihe von Versuchen sogleich fortfahren: Nachdem ich den Strom wieder geöffnet, lege ich einen weichen Eisenstab $e e$ in die primäre Spirale. Wenn ich nun den Strom wieder schliesse, so inducirt er, wie zuvor, in die secundäre Spirale einen Schliessungsstrom, aber ausserdem macht er noch den Eisenstab zu einem Magnet, indem

die Molecularströme desselben sich den Strömen in den Windungen der primären Spirale gleichrichten. Der Eisenstab kann also wieder so angesehen werden, als wäre er plötzlich von electricen Strömen umkreist, welche alle dieselbe Richtung haben, wie der Hauptstrom und welche folglich alle ebenso auf die secundäre Spirale wirken müssen, wie dieser. Der entstehende Schliessungsstrom muss daher sehr viel stärker ausfallen, als zuvor; Sie sehen, dass er das Spaltbild über den Schirm hinauswirft. Ebenso entsteht beim Unterbrechen des Hauptstromes jetzt ein sehr heftiger Oeffnungsstrom, denn in dem Augenblick, in welchem der primäre Strom verschwindet, fallen auch die magnetischen Molecüle in ihre Unordnung zurück, die Ströme, welche den Magnet umkreist haben, hören auch auf, und dies Alles wirkt in gleichem Sinne auf die secundäre Leitung. Endlich lege ich den Eisenstab in die primäre Spirale, schiebe ihn mit dieser, in welcher der Hauptstrom ein für allemal geschlossen bleibt, in die secundäre, und ziehe ihn ebenso mit der primären Spirale aus der secundären heraus; im ersten Falle zeigt wieder das Galvanometer den Schliessungsstrom, im letzten den Oeffnungsstrom an.

Betrachten wir wieder unsere beiden Spiralen allein, ohne Einlage eines Eisenkernes. Der in einer jeden Windung der primären Spirale entstehende oder verschwindende Strom hatte auf eine jede benachbarte Windung der secundären Spirale inducirend gewirkt. Aber eine jede Windung der primären Spirale wirkt ebenso auf eine jede benachbarte Windung *derselben* Spirale. Während wir die in der secundären Spirale entstehenden Inductionsströme *Nebenströme* nennen, heissen die in der primären entstandenen *Gegenströme* oder *Extracurrent*. Ihre Rückwirkung auf den Hauptstrom ist leicht zu übersehen. Der Gegenstrom der Schliessung ist dem Hauptstrome entgegengesetzt gerichtet, und da er in derselben Leitung fliesst, wie dieser, so schwächt er ihn und lässt ihn erst allmählich zu seiner wahren Stärke gelangen. Der Gegenstrom der Oeffnung ist dem Hauptstrome gleichgerichtet; wenn dieser daher unterbrochen werden soll, so verzögert er das Zustandekommen der Unterbrechung. Wiewohl aber beide Gegenströme von gleicher Stärke sind, so wird doch im Allgemeinen der Gegenstrom der Oeffnung weniger schädlich sein, als der der Schliessung, denn der letztere findet immer eine continuirliche Leitung vor und kann sich voll entwickeln; der Gegenstrom der Oeffnung findet dagegen eigentlich keine Leitung vor, wenn nicht eine Zweigleitung, die ihn aufnehmen kann, an Stelle der

unterbrochenen Hauptleitung tritt; nur der Oeffnungsfunke, den wir als ein leitendes Bündel glühender Theilchen kennen gelernt haben, wird auf einige Zeit den primären Strom noch geschlossen halten und so dem Gegenstrom der Oeffnung gestatten, seine verzögernde Wirkung auszuüben. Da nun die electromotorische Kraft der secundären Ströme um so grösser ist, je plötzlicher die Schliessung und Oeffnung der primären Ströme stattfindet, so wird der secundäre Schliessungsstrom in Folge der grösseren Verschleppung des Schliessungsvorganges schwächer ausfallen, als der secundäre Oeffnungsstrom. Wir können uns sowohl den Gang des Zustandekommens und Verschwindens des Hauptstromes unter dem Einfluss der Gegenströme, als auch den Verlauf, welchen in Folge davon

Fig. 51.



die secundären Nebenströme nehmen, graphisch vergegenwärtigen. Der primäre Strom sollte bei seiner Schliessung plötzlich von der Intensität 0 bis auf S anwachsen, bei dieser Stromstärke verharren bis zu seiner Oeffnung, und dann ebenso plötzlich auf 0 abfallen. Dadurch würden in der secundären Leitung die kurzdauernden und ganz gleich verlaufenden Schliessungs- und Oeffnungsströme α und β entstehen. In Folge der Gegenströme wächst aber der Hauptstrom nur allmählich von 0 bis d, dann wird er constant; dieser allmählichen Schliessung entsprechend entsteht der Schliessungsstrom $\gamma \delta$, der von dem Moment an, wo die Constanz des Hauptstromes erreicht ist, abfällt. Soll p geöffnet werden, so wächst der Hauptstrom zunächst durch den Gegenstrom von e bis f, und erzeugt dadurch wieder einen Schliessungsinductionsstrom $\epsilon \phi$, dann fällt aber der Hauptstrom jäh ab bis 0, und dem entsprechend bildet sich der kurze aber kräftige Oeffnungsinductionsstrom $\phi \chi$.

Alle diese Erscheinungen finden ebenfalls und selbstverständlich viel kräftiger statt, wenn nun die Spiralen wieder den Eisenkern enthalten. Aber dieser Kern wirkt noch in anderer Weise auf den Gang

der Ströme ein. Schieben wir nämlich ein Blechrohr dd über die primäre Spirale, entweder so, dass es auch über die secundäre geschoben ist, oder so, dass es sich zwischen beiden befindet, so können wir uns dasselbe der Länge nach aus lauter einzelnen Ringen zusammengesetzt denken. Wird der primäre Strom geschlossen oder geöffnet, so entstehen in diesen Ringen wieder Schliessungs- und Oeffnungsströme, welche in die Classe der Nebenströme gehören, aber durch die inducirende Rückwirkung, welche sie auf die primäre Leitung ausüben, ebenso schädlich wirken, wie die Gegenströme. Man muss deshalb eine jede solche in peripherischer Richtung continuirliche Metallmasse in den Spiralen vermeiden, man darf dieselben nicht auf Blechröhren wickeln, oder man muss diese wenigstens der Länge nach aufschlitzen, um ihre Continuität zu unterbrechen. Ganz in derselben Weise schaden massive Eisenmassen in der Inductionsspirale. Auch in ihnen entstehen solche peripherische Nebenströme, und ausserdem brauchen grosse zusammenhängende Eisenmassen eine sehr beträchtliche Zeit, um mit ihrer Durchmagnetisirung und Entmagnetisirung zu Stande zu kommen. Der Eisenkern muss daher ersetzt werden durch ein Bündel dünner Eisendrähte. Selbst wenn seine Masse weit geringer ist, als die des massiven Kernes, wirkt es wegen der Plötzlichkeit, mit der es die Stromschlüsse und Oeffnungen zu Stande kommen lässt, weit vortheilhafter. Ich habe den Strom eines Grove-elementes in eine Metallfeder geleitet, welche gegen die Zähne eines Zahnrades schleift, von diesem geht er durch eine primäre Spirale zum Element zurück. Auf der primären Spirale steckt eine secundäre, deren Drahtenden zu zwei Handhaben h_2 , welche mit feuchten Schwämmen bedeckt sind, führen. Schliesst man durch den eignen Körper die secundäre Leitung und bringt durch Drehen des Rades eine Reihe von Schliessungen und Unterbrechungen hervor, so empfindet man die dadurch verursachten Inductionsströme viel heftiger, wenn ein Drahtbündel, als wenn ein massiver Eisencylinder ee in die Spiralen geschoben wird.

Fügen wir nun noch hinzu, dass man die primäre Spirale von dickem Draht machen muss und ihr nicht zu viele Windungen geben darf, weil sonst der primäre Strom durch den grossen Widerstand zu sehr geschwächt würde, dass dagegen die secundäre Spirale möglichst viele Windungen haben muss (und dabei dünne Drähte haben darf), weil die electromotorische Kraft des Inductionsstromes mit dem Quadrate der Windungszahl wächst, so sind alle Thatsachen bekannt, welche wir

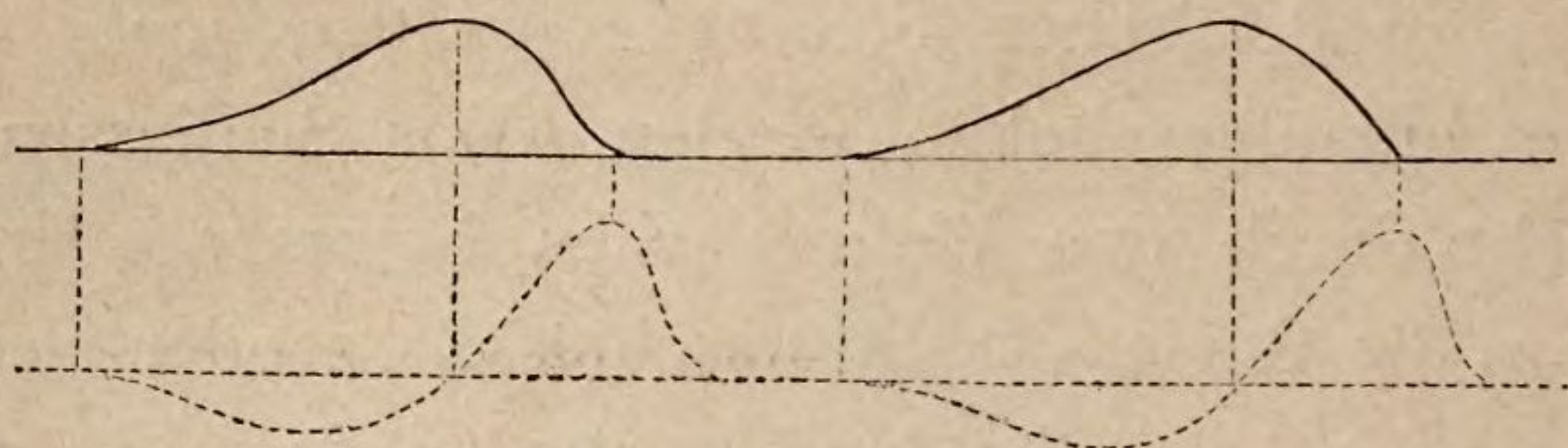
brauchen, um einen *Inductionsapparat* mit allen seinen Vorrichtungen verstehen zu können.

Der für therapeutische Zwecke soviel angewandte Stöhrer'sche Apparat ist so construirt, dass man bequem seine Einrichtung überschauen kann. Die primäre Spirale *pp* ist festgestellt; sie umschliesst ein Bündel von Eisendrahten *ee*. Die secundäre Spirale *ss* kann, nach dem Princip des du Bois'schen Schlittenapparates, mehr oder weniger auf die primäre hinaufgeschoben werden. Das Schliessen und Unterbrechen geschieht durch den Wagner'schen Hammer oder Selbstunterbrecher, der an die Stelle des Stromschlüssels *z* oder des soeben angewandten Zahnrades tritt. Er besteht aus einem kleinen Eisenanker, welcher durch eine Feder dicht vor dem einen Ende *e* des Eisendrahtbündels gehalten wird. Diese Feder ist selbst ein Theil der Leitung und schliesst den Strom, indem sie sich gegen eine Platinplatte legt. Beim Schluss des Stromes wird das Eisenbündel magnetisch, zieht den Anker an, unterbricht dadurch den Strom, die Feder schliesst ihn wieder, und so arbeitet der kleine Apparat, in seinem Gange durch eine Schraube verstellbar, selbstunterbrechend fort. Lassen wir zuerst die secundäre Spirale entfernt von der primären, so können wir die mit *p* bezeichneten Klemmschrauben benutzen, um durch die Handhaben *h₁* den Gegenstrom zu bekommen. Schieben wir jetzt die secundäre Spirale über die primäre und fassen statt der Handhaben *h₁* die mit *ss* verbundenen Handhaben *h₂*, so empfinden wir die Wirkung der secundären Inductionsströme, der Nebenströme, und zwar um so stärker, je weiter die secundäre Spirale auf die primäre geschoben ist (oder bei den Hirschmann'schen Apparaten auch, je weiter das Drahtbündel in die primäre Spirale hineingeschoben worden ist). Wird der secundäre Strom geschlossen gehalten, während man sich als Zweig in den primären eingeschaltet hat, so wird durch die inducirende Rückwirkung der primäre Strom geschwächt, ebenso der secundäre, wenn der Hauptstrom eine Zweigschliessung enthält. Man muss deshalb jeden der beiden Ströme nur anwenden, während die andere Leitung geöffnet ist.

Die im Inductionsapparat erzeugten Ströme, die Ströme, welche man in der Medicin die *faradischen* zu nennen pflegt, bestehen in einer schnellen Abwechselung von Oeffnungs- und Schliessungsströmen. Der Verlauf dieser Ströme ist aus dem bisher Gesagten ersichtlich: der Hauptstrom wächst vom Momente der Schliessung an allmählich bis zu einem Maximum; sobald er dies erreicht hat, fällt er jäh auf 0 herab, um bald sein Wachsen wieder zu beginnen. Dem zufolge entsteht eine

Reihe abwechselnder Schliessungs- und Oeffnungsströme, von denen die ersteren die ganze Zeit der Schliessung über dauern, während die letzteren sich schnell zu bedeutender Höhe erheben und ebenfalls schnell verschwinden. Das aber, was die Muskelzuckung in unserem Körper hervor-

Fig. 52.



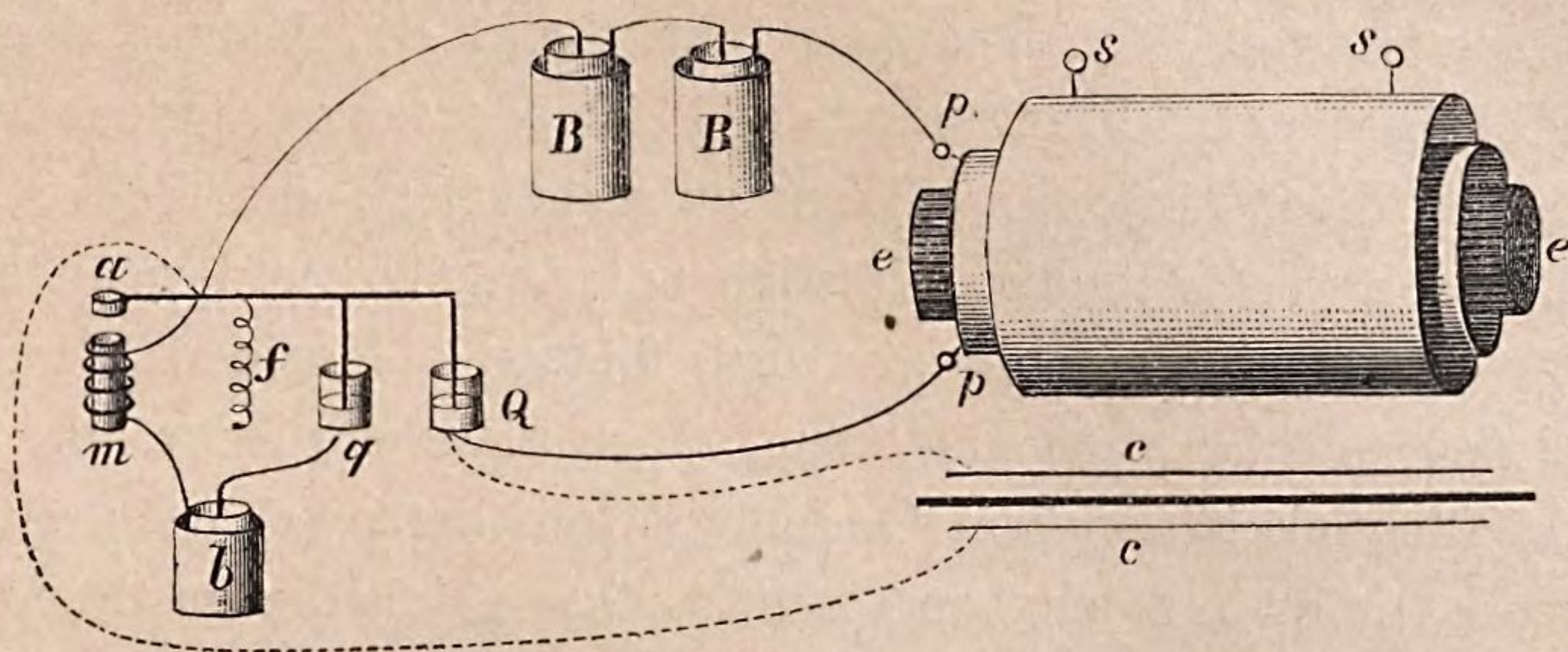
bringt, ist nicht die absolute Höhe, zu der sich ein Strom überhaupt erhebt, sondern es ist der Sprung in der Stromstärke. In je kürzerer Zeit dieser Sprung erfolgt, desto heftiger ist seine Wirkung und darum empfinden wir von den alternirenden Strömen vorzugsweise den Stoss, den der Oeffnungsstrom ausübt, ja man bezeichnet sogar oft die Richtung der alternirenden Ströme nach der Richtung des Oeffnungsstromes. Am Galvanometer kann man alternirende Ströme nicht messen, sie bringen die Magnetnadel zu keiner steten Ablenkung. Wird aber der Magnet durch ein Solenoid ersetzt, welches an zwei Drähten bifilar aufgehängt ist, und lässt man die alternirenden Ströme hintereinander durch den Multiplicator und das in demselben hängende Solenoid gehen, so lenkt der feste Strom den beweglichen wieder ab, weil beide stets in demselben Momente alterniren, relativ also die Richtung in beiden Leitungen immer dieselbe ist. So erhalten wir das *Electrodynamometer*. Ausser diesem giebt es noch eine Vorrichtung, welche zur Wahrnehmung alternirender Ströme geeignet ist, das ist der stromprüfende Froschschenkel. Auch hier heben sich die in abwechselnder Richtung auf den Nerv ausgeübten Reize nicht auf, sondern addiren sich in ihrer Reaction auf den Muskel.

Im Schlitten-Apparat haben wir in der Stellung der secundären Spirale selbst ein Mittel, den secundären Strom zu verstärken oder zu schwächen. Sind beide Spiralen fest aufeinander gewickelt, so können wir die Wirkung des Apparates dämpfen. Man schiebt, wie bei den Ruhmkorff'schen Taschenapparaten, eine Blechhülse über die Spiralen; die vorher beschriebene Rückwirkung der in dieselbe inducirten Ströme findet hier ihre Anwendung.

Grössere Inductionsapparate, z. B. der grosse Ruhmkorff'sche, den ich hier aufgestellt habe, haben eine abgesonderte Unterbrechungs-

vorrichtung. Durch eine kleine Batterie *b* wird der Eisenstab *m* magnetisirt; er zieht den Anker *a* an und unterbricht dadurch den Strom, indem er eine Platinspitze aus dem Quecksilbergefäss *q* aushebt; die Feder *f* schliesst den Strom wieder. Der hierdurch fortarbeitende Hammer hebt

Fig. 53.



aber gleichzeitig eine zweite Platinspitze aus dem Quecksilbergefäss *Q*, und dadurch wird der Strom der Hauptbatterie *BB*, welcher durch die primäre Leitung *pp* geführt werden soll, in demselben Rhythmus unterbrochen und geschlossen, wie der Strom von *b*. Das Quecksilber in den Unterbrechungsgefässen ist mit Weingeist bedeckt, weil in diesem der Unterbrechungsfunke nicht so zu Stande kommt, wie in der Luft, und deshalb der Vorgang der Stromöffnung ein kürzerer ist. Lässt man die beiden Enden der secundären Spirale *ss* zunächst unverbunden und untersucht während des Ganges des Apparates electroskopisch deren Electricitäten, so wird man sie bald positiv, bald negativ finden, weil man bald die durch den Schliessungsstrom, bald die durch den Oeffnungsstrom herangeführte Electricität erhält. Nähert man sich aber nur einem der Polenden, so dass ein Funke aus demselben gezogen wird, so ist die so erhaltene Electricität immer die durch den Oeffnungsstrom herangeführte, denn nur diese Electricität hat die hinreichende Dichtigkeit, um das Ueberspringen eines Funkens zu ermöglichen. Besonders stark wird dieses Auftreten freier Electricität an dem Drahtende, welches den oberflächlich aufgewickelten Drahtlagen angehört; die Electricität der inneren Lagen wird durch die umgebenden Leiter theilweise gebunden. Nähern wir zwei an den beiden Polschrauben befestigte Drähte einander, so geht zwischen ihnen ein Funkenstrom über, der in jeder Beziehung dem der Influenzmaschine gleicht. Die Annäherung der beiden Drähte muss indess noch immer eine ziemlich grosse sein, um den Uebergang des

Stromes zu ermöglichen. Die Schuld hieran trägt die noch immer zu lange Dauer des Oeffnungsfunkens am Quecksilberunterbrecher. Sobald der Strom unterbrochen wird, häufen sich durch den Gegenstrom auf beiden Seiten der Unterbrechungsstelle grosse Electricitätsmassen an, welche den Oeffnungsfunken verstärken und den Stromschluss noch eine Zeit lang unterhalten. Verbindet man die auf den beiden Seiten der Unterbrechungsstelle *Q* liegenden Leitertheile des Hammers mit den beiden Belegen einer Franklin'schen Tafel oder eines Condensators, so werden die Electricitäten in diesen aufgespeichert, der Funke zerreisst schnell, der Strom wird also plötzlich unterbrochen und wenn er durch den Hammer wieder geschlossen wird, fliessen die beiden Electricitäten wie bei der gewöhnlichen Entladung einer Flasche wieder ab. So wird also die Dichtigkeit der vom Oeffnungsstrom herangeführten Electricität bedeutend erhöht und ich kann jetzt, nachdem ich die aus Stanniol und Wachstaffet gebildete, unter dem Inductionsapparat liegende Franklin'sche Tafel eingeschaltet habe, die Poldrähte weit auseinander ziehen, die Funken strömen noch immer über. Verbinde ich die Polschrauben *s* und *s* ebenfalls mit den Belegen einer leydener Flasche, so verwandelt sich, ganz wie bei der Holtz'schen Maschine, der Funkenstrom in eine Reihe explosiver Flaschenentladungen. Schalte ich zwischen den beiden Polschrauben eine mit einem verdünnten Gase gefüllte Geissler'sche Röhre ein, so erhalten wir die vom Strom der Holtz'schen Maschine erzeugten Lichterscheinungen in viel prachtvollerem Glanze. Ich zeige Ihnen wiederum einige solche mit verdünnten Gasen, Stickstoff, Kohlensäure, Wasserstoff gefüllte Röhren. Ausser den Fluorescenzerscheinungen, welche das electrische Licht in einigen Substanzen, namentlich im Uranglase, aus dem einige Glastheile gefertigt sind und der Aesculinlösung, mit der einige Röhren gefüllt sind, besonders stark hervorruft, erkennen Sie wieder die den genannten Gasen charakteristischen Farben und das dem negativen Pole charakteristische violette Glimmlicht. Sobald ich durch den Commutator die Richtung des primären Stromes umkehre, springt dieses Licht von einem der Drähte, durch den der Inductionsstrom in die Geissler'sche Röhre eintritt, zum anderen über. Sie sehen ferner in einigen Röhren, welche brennbare Gase enthalten, die regelmässige Schichtung des Lichtes, deren Erklärung noch immer nicht geglückt ist, und in einer Kugelhöhre, welche ein Gemisch von Sauerstoff, Stickstoff und wasserfreier Schwefelsäure enthält, das lebhaftes Nachleuchten, welches noch nach Aufhören des Inductionsstromes

stattfindet. In einem electrischen Ei haben wir früher schon den Lichtstrom kennen gelernt. Ein weicher Eisenstab, mit einer Glashülle bedeckt, ist in das Ei eingelassen; der Lichtbogen geht an irgend einer Stelle parallel neben ihm hin. Ich stelle aber das Ei auf einen starken Magnetpol, der Eisenstab wird selbst zum Magnet, und der Lichtstrom rotirt nun um ihn, wie früher der Leitungsdraht um den Magnet rotirte.

Ich zeige Ihnen endlich einen Versuch, an dem Sie wieder die Wirkung der intermittirenden Beleuchtung erkennen können, welche der Inductionsstrom erzeugt, wie Sie sich früher durch den rotirenden Farbenkreisel vom kurzdauernden Lichte der Flaschenentladung überzeugen konnten. Wenn ich eine Leuchtröhre um ihr eines Ende rotiren lasse, während sie vom Inductionsstrom durchflossen ist, so erscheint sie im Dunklen nur so oft leuchtend, als der inducirende Strom unterbrochen wird; in den Zwischenzeiten ist sie dunkel. Sie sehen deshalb radienförmig eine Reihe leuchtender Röhren in Kreisen herumliegen, deren Abstand mit der Rotationsgeschwindigkeit wächst und mit der Zahl der Stromunterbrechungen abnimmt. Je nach der Wahl dieser beiden Grössen kann das so entstehende Bild ruhen, mit der Rotation vorwärts oder gegen dieselbe rückwärts gehen.

ZEHNTER VORTRAG.

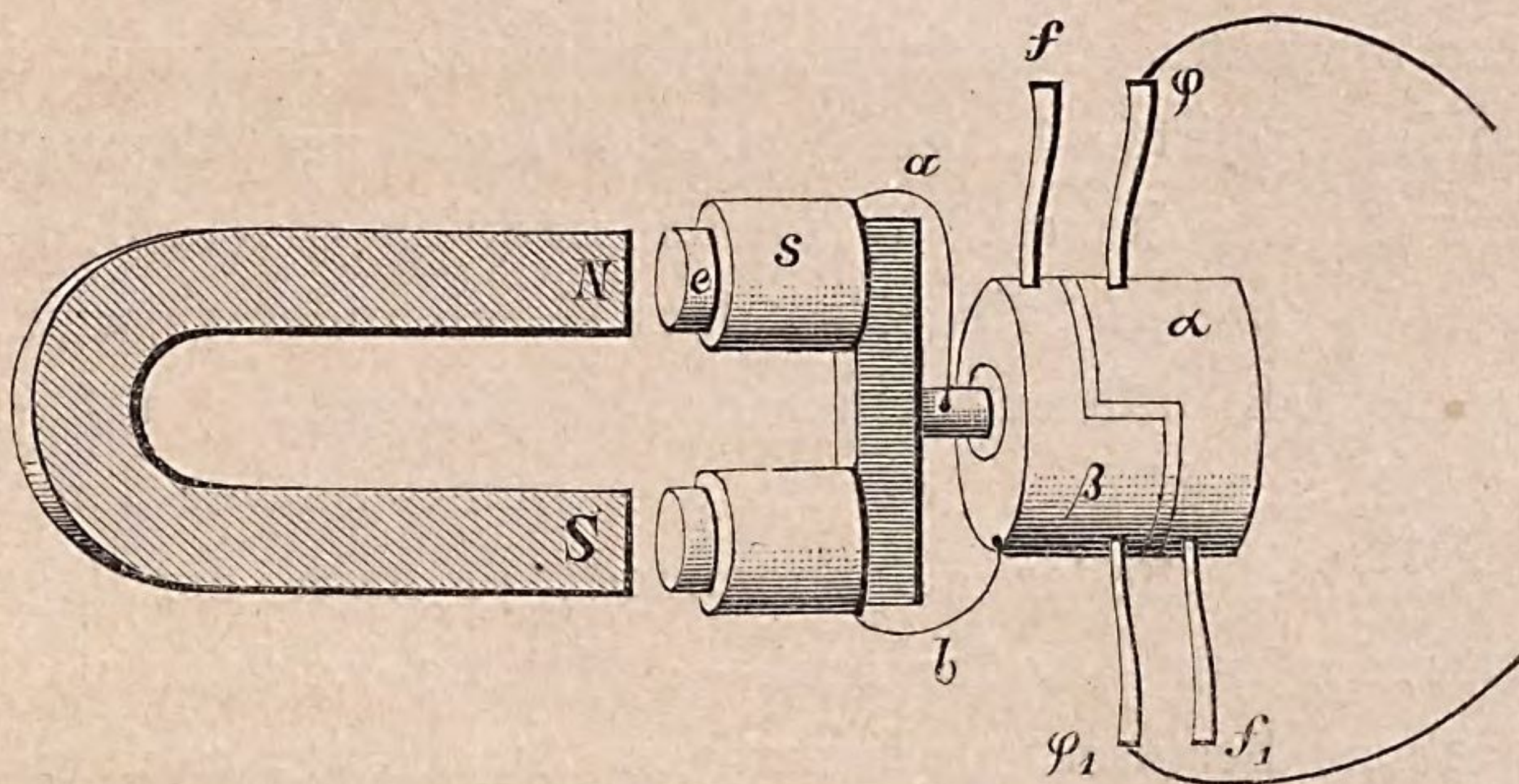
Meine Herren!

Von den Versuchen, durch welche ich Ihnen die Grunderscheinung der Induction vorzeigte, bestand der letzte darin, dass ich einen weichen, von einer geschlossenen primären Spirale umgebenen Eisenkern mit dieser in die secundäre Spirale steckte und dann wieder herauszog. Wir erhielten so zuerst einen starken Schliessungs-, dann einen starken Oeffnungsstrom. Den von einem Strom umflossenen Eisenkern, einen Electromagnet, kann ich aber durch einen Stahlmagnet ersetzen und dadurch gehen die Erscheinungen der Electroinduction in die der *Magnetinduction* über. Ich stecke den Magnetstab in die Spirale, die einzige, die wir jetzt anzuwenden haben, die wir aber immer noch als die secundäre betrachten wollen und deren Drahtenden zum Galvanometer führen. Der von diesem angezeigte Strom gilt als Schliessungsstrom. Der Kürze wegen wollen wir seine Richtung mit $+$ bezeichnen. Ziehe ich den Magnet aus der Spirale heraus, so erhalte ich einen Oeffnungsstrom von der Richtung $-$. Drehe ich den Magnet um und stecke ihn, den andern Pol vorausführend, in die Spirale, so erhalte ich wieder einen Strom $-$ und ziehe ich ihn jetzt wieder heraus, so hat der Oeffnungsstrom die Richtung $+$, denn durch die Umkehrung des Magnets hatte ich auch die Richtung aller der Ströme umgekehrt, von denen wir ihn umkreist denken. Statt des Stahlmagnets kann ich weiter einen Eisenstab anwenden, der durch Anlegen an einen Magnetpol magnetisirt und durch Abreissen von demselben entmagnetisirt wird. Ich lasse den Stab fest in der Spirale stecken und lege seine beiden herausragenden Enden plötzlich an die Pole eines starken Hufeisenmagnets. Das thut

dieselbe Wirkung, wie wenn ich einen Magnetstab in die Spirale gesteckt hätte, ich erhalte einen Strom $+$. Reisse ich den Eisenstab vom Magnet ab, so entsteht ein Oeffnungsstrom $-$, kehre ich den Stab mit seiner Spirale um und lege ihn in dieser verkehrten Stellung an die Magnetpole, so ist die Stromrichtung $-$, reisse ich den Stab ab, so ist sie $+$. Wenn ich die beiden Enden der Spirale nicht mit dem Galvanometer verbinde, sondern an jedem derselben einen kurzen Draht befestige, so dass beide Drähte gegeneinander federn, so springt beim Abreissen des Eisenstabes ein Unterbrechungsfunke zwischen den Drähten über.

Um die angegebenen Operationen bequemer und fortgesetzt ausführen zu können, wird der Eisenstab in einen Anker e umgewandelt, der

Fig. 54.



vor den Polen eines Hufeisenmagnets rotiren kann und zwei unter einander zusammenhängende Spiralen s trägt. Beim Drehen eines solchen *Inductors* entsteht dann eine Reihe von Strömen alternirender Richtung, von denen immer zwei auf einander folgende gleichgerichtet sind ($++$), dann wieder zwei unter sich gleichgerichtet ($--$) u. s. f. Diese Ströme treten durch die Drahtenden a und b aus, und wenn wir a mit der Axe und dadurch mit dem mit dieser Axe leitend zusammenhängenden Ringe α , b aber mit dem gegen die Axe isolirten Ringe β verbinden, so können wir die alternirenden Ströme durch die schleifenden Federn f und f_1 aus dem Apparate unserer *magnetelectrischen Maschine* herausleiten. Ich verbinde die Federn mit dem Galvanometer, zuerst erzeugen die alternirenden Ströme gar keine Ablenkung, bei fortgesetztem Drehen tritt bald einmal eine Ablenkung nach der einen, bald nach der anderen Seite ein, durch zufällige Unregelmässigkeiten im Alterniren

veranlasst. Auch diese alternirenden Ströme magnetelectrischen Ursprungs könnte ich nur am Electrodynamometer oder am stromprüfenden Froschschenkel wahrnehmen. Am ersteren geben sie wieder, wie die Electroinductionsströme, eine stete Ablenkung, weil der Strom im Multiplicator und im bifilar aufgehängten Solenoid zugleich seine Richtung wechselt. Lasse ich die Zinken einer magnetisirten Stimmgabel vor einem ruhenden Inductor tönen, so inducirt die abwechselnde Annäherung und Entfernung des Magnets in die Inductorwindungen solche alternirende Ströme, von denen das Dynamometer Kunde giebt; eben dahin gehören die alternirenden Ströme, von denen die Leitungsdrähte eines Telephonpaares durchlaufen werden. Die von der schwingenden Stimmgabel und dem Telephon erzeugten Ströme können ebenso am stromprüfenden Froschschenkel sichtbar gemacht werden, das Galvanometer aber reagirt auf beide nicht.

An der magnetelectrischen Maschine können nun aber die beiden, gegen einander isolirten Ringe α und β auch zur Commutation der alternirenden Ströme dienen. Wenn ich nämlich die beiden Federn in die Stellungen φ und φ_1 bringe, so dass sie einander gegenüber stehen, so schleift eine jede während einer halben Umdrehung auf α , während der andern halben auf β , es werden also immer Ströme derselben Richtung von derselben Feder aufgenommen, je nach der Richtung der Drehung entweder nur $+$ oder nur $-$. Jetzt giebt denn auch das Galvanometer einen bestimmten einseitigen Ausschlag, und während die durch die Federn f und f_1 abgeleiteten Ströme nur für physiologische Zwecke verwendbar waren, kann man die aus φ und φ_1 entnommenen gebrauchen wie gewöhnliche Batterieströme, man kann polare chemische Zersetzungen mit ihnen vornehmen. Ganz gleichartig mit Volta'schen Strömen sind die continuirlich gerichteten magnetelectrischen freilich noch immer nicht, da während einer jeden Vierteldrehung der Axe ein Anwachsen und Abnehmen der Stromstärke stattfindet. Die electromotorische Kraft solcher magnetelectrischer Ströme nimmt mit der Anzahl der Windungen der Inductionsspirale und mit der Anzahl der Polwechsel im rotirenden Anker, also mit der Drehungsgeschwindigkeit der Maschine zu. Man kann daher bei gleicher Drehungsgeschwindigkeit eine grössere electromotorische Kraft erzielen, wenn man die Zahl der Magnete und Anker in derselben Maschine vermehrt, also etwa über den sechs Polen dreier vertical gestellter Hufeisenmagnete drei Anker rotiren lässt, wie es Stöhrer thut. Je nach dem äusseren Widerstande,

den der Strom überwinden soll, wird man die Drähte, mit denen die Inductoren umwunden sind, dick und kurz oder lang und dünn wählen, und dann die einzelnen Spiralen unter einander nach den uns von den galvanischen Batterien her bekannten Gesetzen neben- oder hintereinander verbinden. Sie sehen die lebhaften Funken, welche die Schleifedern am Commutator einer solchen Maschine liefern.

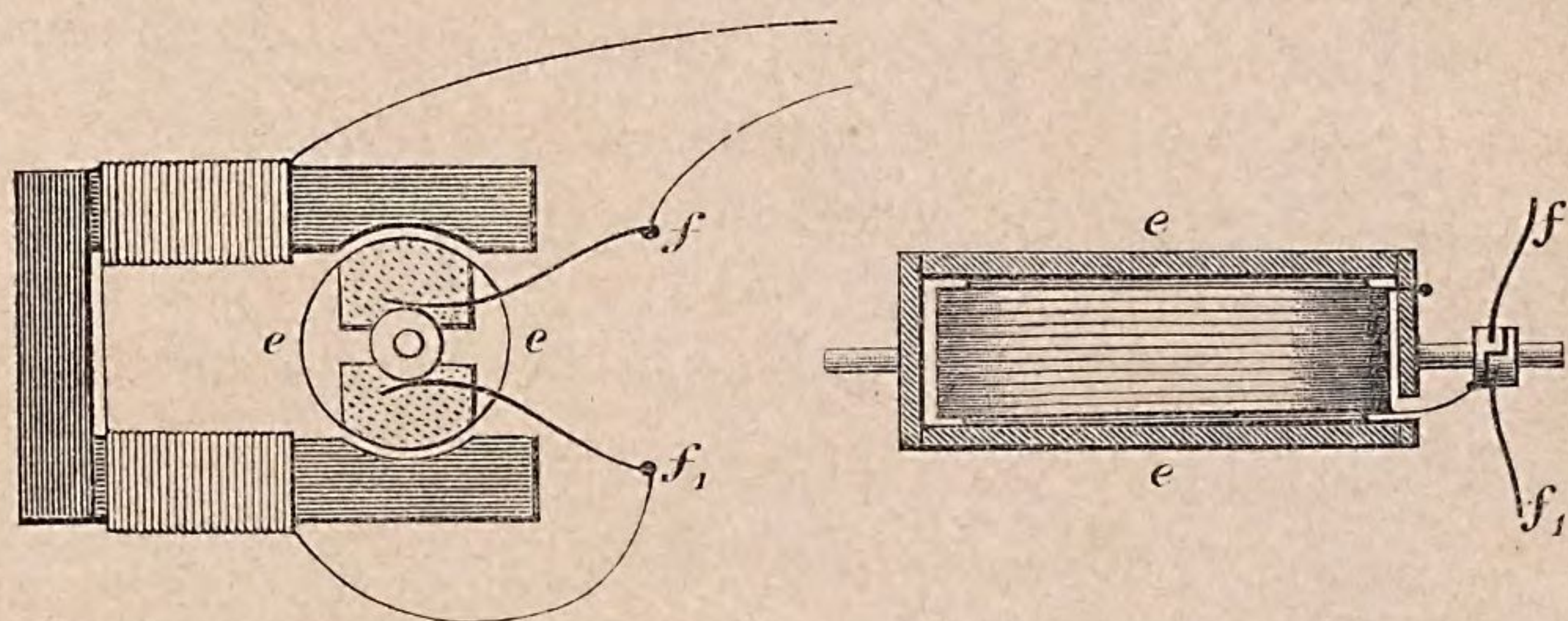
Jetzt wollen wir unsere einfache magnetelectrische Maschine umgekehrt anwenden, wir wollen sie in eine *electromagnetische Kraftmaschine* umwandeln. Zu dem Ende brauchen wir nur durch die Federn φ und φ_1 , durch welche vorher der continuirliche Strom aus der Maschine austrat, den continuirlichen Strom einer galvanischen Batterie in gleicher Richtung einzuführen, die Maschine setzt sich dann selbst in Bewegung und zwar in der der früheren Rotation entgegengesetzten Richtung. Während nämlich vorher durch Annäherung des Eiseninductors e an den Pol N ein Südpol am Ende von e entstand und dadurch der Schliessungsstrom erregt wurde, wird jetzt derselbe Pol von e nordmagnetisch gemacht und deshalb von dem Nordpole des festen Magnets abgestossen. Der im Commutator bei jeder halben Drehung eintretende Stromwechsel sorgt dafür, dass jeder Pol des Inductors, so lange er sich dem festen Pole N nähert, süd magnetisch ist und, sobald er durch seine Trägheit ein wenig über N hinausgetreten ist, nordmagnetisch wird. Die Abstossung findet also fortgesetzt in der gleichen Richtung statt und der Anker mit seinen Spiralen und dem Commutator geräth dadurch in eine regelmässige Rotationsbewegung. Während also die magnetelectrische Maschine Arbeit in Electricität umsetzt, erzeugt die electromagnetische Arbeit aus Electricität. Wir können uns sehr wohl solcher im Kleinen ausgeführten Apparate zur Erzeugung rotirender Bewegungen bedienen, z. B. um einen kleinen Spiegel in Drehung zu versetzen, den wir ja so häufig anwenden, um in sehr kurzen Zeiträumen vorgehende Bewegungen zu analysiren. Zur Ausführung im Grossen hat sich aber die Maschine nicht bewährt, auch nicht, wenn wir manches an ihrer Einrichtung ändern. Ich setze hier eine, nach einem andern Princip gebaute Maschine in Bewegung, sie ist eigentlich ein grobes mit Commutation versehenes Galvanometer. Die Magnetnadel ist durch einen Electromagnet ersetzt, der durch denselben Strom erregt wird, welcher den Multiplicator durchfliesst. Ist das Maximum der Ablenkung, der rechte Winkel, erreicht, so setzt ein Commutator plötzlich die Richtung des Stromes im Electromagnet, aber nicht die im Multiplicator um;

der Electromagnet wird also nach der anderen Seite hin abgelenkt, und rotirt so fortgesetzt im Multiplicator. Noch ein drittes Princip kann zur Herstellung electromagnetischer Kraftmaschinen angewandt werden: die Einziehung eines Eisenstabes in eine Spirale. Ich stelle eine dickdrähtige Spirale lothrecht auf und bringe von unten her einen weichen Eisenstab in das Innere derselben. Schliesse ich den Strom durch die Spirale, so wird mir der Stab aus der Hand gerissen und schwebt frei in der Spirale. Unterbreche ich den Strom, so fällt der Stab heraus, schliesse ich wieder, so wird er wieder eingezogen. Diese hin- und hergehende Bewegung kann in ganz ähnlicher Weise zur Hervorbringung einer drehenden Bewegung nutzbar gemacht werden, wie das Auf- und Abgehen des Kolbens im Cylinder der Dampfmaschine, während das Oeffnen und Schliessen des Stromes durch einen Commutator bewirkt wird, den die Maschine selbst bewegt, wie die Dampfmaschine ihre Steuerung. Aber abgesehen davon, dass das Heizmaterial für electromagnetische Maschinen, das wir bei der Betrachtung der chemischen Vorgänge in der Batterie kennen gelernt haben, ein sehr kostbares ist, haben alle diese Maschinen denselben Fehler. Im Augenblick der grössten Annäherung der Inductorpole an die Magnetpole wird nämlich der Strom umgekehrt und dadurch entstehen in den Spiralen Gegenströme, welche den Hauptstrom schwächen. Mit den grösseren Dimensionen der Maschine wächst dieser Uebelstand, der bei den in abgeänderter Form construirten ebenfalls, nur auch in etwas anderer Gestalt, vorhanden ist. Aber gerade aus diesen Gegenströmen hat Siemens Nutzen gezogen, um die besten magnetelectrischen Maschinen, welche wir besitzen, die *dynamoelectrischen*, zu construiren. Wir können uns dieselben zunächst aus unserer alten Maschine entwickelt denken, wenn wir nur an Stelle des Stahlmagnets einen Electromagnet setzen. Leiten wir jetzt einen Batteriestrom erst durch die Leitungen des Electromagnets, so dass N wieder ein Nordpol wird, dann durch die ganzen Inductionsspiralen und drehen nun die Axe mit dem Inductor entgegengesetzt der Drehungsrichtung, welche sie durch die Wirkung der electromagnetischen Kraftmaschine annehmen würde, so addiren sich jetzt jene Gegenströme zum Hauptstrom, statt sich von ihm zu subtrahiren. Der Strom wächst immer mehr an, der Magnet wird immer kräftiger und die Maschine setzt daher Arbeit in der zweckmässigsten Weise in Electricität um. Die Batterie, mit deren Hilfe dieser Process eingeleitet wurde, kann bald ganz ausgeschaltet werden, die in der Inductionsspirale erzeugten Ströme magnetisiren den Electromagnet immer weiter. Bleibt aber die

Maschine stehen, so verschwindet aller Magnetismus. Auch das kann aber vermieden werden, wenn man den festen Magnet aus nicht ganz weichem Eisen anfertigt; dann bildet sich in ihm ein kleiner magnetischer Rückstand, welcher ausreicht, um die Induction zu beginnen; der Inductionsstrom setzt dann die Magnetisirung fort.

Die bisher angewandte Form der Inductoren ist für die Zwecke der dynamoelectrischen Maschine nicht günstig. Siemens hat eine andere Form eingeführt, welche auch in den Ladd'schen Maschinen angenommen worden ist. Zwei einander parallel gegenüberstehende Eisenplatten e sind durch eine senkrecht gegen sie gestellte Eisenplatte miteinander verbunden. Um diese letztere sind die Windungen so gelegt, dass der ganze freibleibende Raum ausgefüllt und dem ganzen Inductor dadurch die Form eines langgestreckten Cylinders ertheilt wird. Seine Drahtenden sind wie früher mit den beiden gegeneinander isolirten Commutatorringen verbunden, gegen welche die beiden Federn f und f_1 schleifen. Der lange Inductor liegt in cylindrischen Höhlungen zwischen den Schen-

Fig. 55.

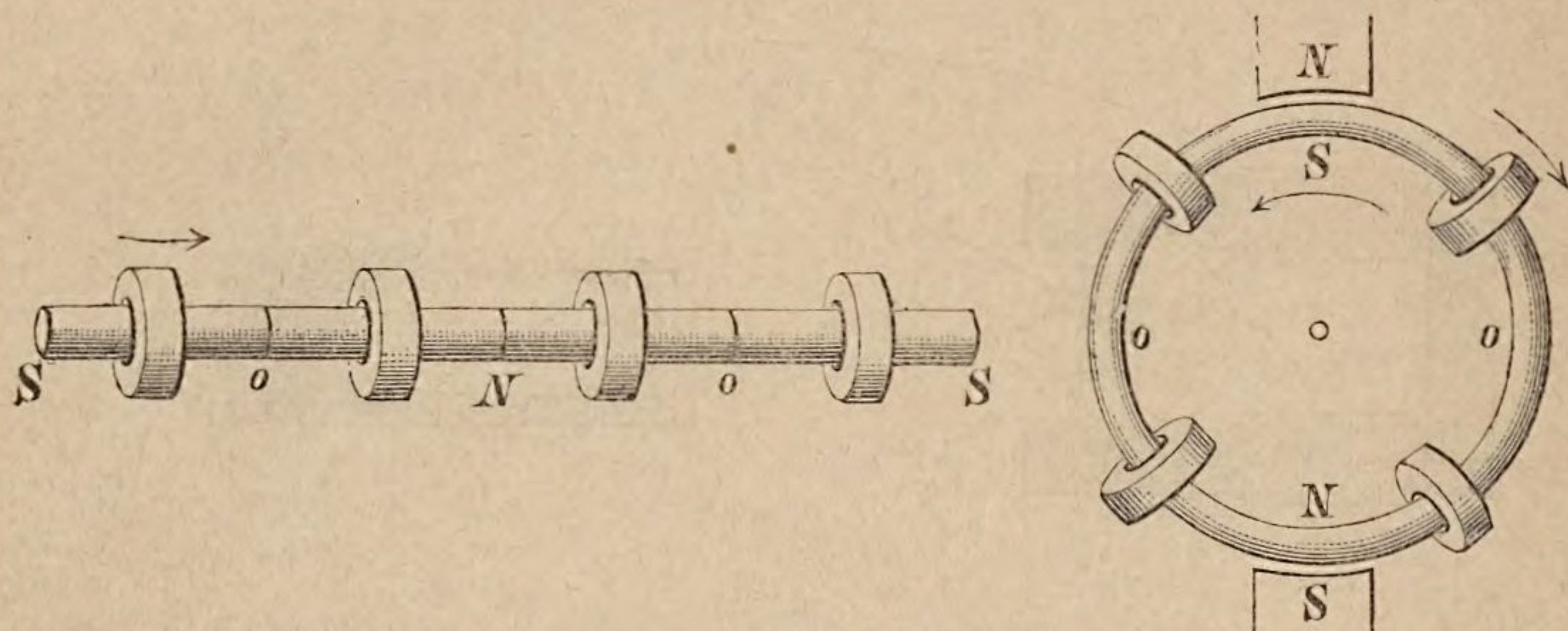


keln eines sehr breiten Electromagnets. Der durch den kleinen magnetischen Rückstand inducirte Strom wird von f_1 durch die Windungen des Electromagnets geführt und wenn wir nun die beiden freien Leiterenden unter sich schliessen und die Maschine weiter drehen, so setzt sich der Drehung ein immer wachsender Widerstand entgegen, weil der Magnet immer kräftiger wird und immer stärker anziehend auf die Eisenplatten des Inductors wirkt. Wenn der Strom eine hohe Intensität erlangt hat, so unterbreche ich ihn plötzlich und lasse ihn in eine Nebenleitung treten, welche eine Unterbrechungsstelle hat. Die Dichtigkeit der gesammelten Electricität genügt, um hier einen kräftigen Funken zu erzeugen, den ich an beliebiger Stelle zur Entzündung einer Sprengpatrone

benutzen kann. An einer andern Maschine ähnlicher Construction lasse ich eine Stahlfeder auf einem gezahnten Rade schleifen. Durch die heftigen Unterbrechungsfunken geräth die Feder selbst ins Brennen. Ersetze ich die Federverbindung durch die Leitungen zu einem Wasserversetzungsapparat, so erhalten wir eine lebhafte Knallgasentwicklung.

Wieder eine andere Gestalt haben die Inductoren der dynamoelectrischen Maschinen von Gramme. Denken wir uns zwei Magnetstäbe der Länge nach an einander gelegt, so dass sie sich mit ihren beiden Nordpolen berühren. Wenn ich eine Inductionsspirale vom einen Südpole her über diese Stäbe schiebe, so kann ich mir ihren Weg in vier Abtheilungen zerlegt denken. In der ersten bewegt sie sich vom Südpol S bis zum Indifferenzpunkte o des ersten Magnets; in ihr entsteht ein Schliessungsstrom von der Richtung +; in der zweiten Abtheilung geht sie von o bis N, der Magnet wird aus ihr herausgezogen, also entsteht ein Oeffnungsstrom —; in der dritten Abtheilung entsteht ein Schliessungsstrom bei entgegengesetzter Magnetrichtung, also von der Richtung —

Fig. 56.



und in der vierten Abtheilung des Weges wieder ein Oeffnungsstrom +. Wären die Stäbe zu Halbkreisen gekrümmt, wären also auch die beiden Südpole der Magnete an einander gestossen und so ein geschlossener Ring gebildet, so würde in der Spirale bei jedem Umgange um den ganzen Ring wieder eine Reihe von alternirenden Strömen gebildet, von denen je zwei aufeinander folgende gleiche Richtung haben. Die Gramme'sche Maschine bringt nun dieses Princip in der Weise zur Ausführung, dass sie einen aus dünnen Eisendrähten gewickelten Ring so zwischen die beiden Magnetpole N und S bringt, dass sich an zwei diametral gegenüberliegenden Punkten des Ringes die Pole S und N bilden; um 90° davon liegt nach jeder Seite hin ein Indifferenzpunkt.

Wird dieser Ring um seinen Mittelpunkt gedreht, so treten immer neue Stellen vor die Magnetpole, die im Ringe gebildeten Pole bleiben aber immer den Magnetpolen gegenüber liegen. Wenn nun eine Reihe von Inductionsspiralen auf dem Eisenringe befestigt ist und mit demselben rotirt, so werden in ihnen die Ströme gerade so inducirt, wie wenn sie über einen aus zwei halbkreisförmigen Magneten zusammengesetzten Ring hingeschoben würden. Auch in ihnen entstehen Ströme, welche mit jeder halben Umdrehung ihre Richtung ändern; auf der oberen Hälfte der Umdrehung von 0 bis 0 haben sie die Richtung +, auf der unteren —. Zwei Systeme schleifender Federn oder aus Metallfäden gebildeter Pinsel nehmen diese Ströme auf und zwar das eine immer die in der Richtung +, das andere die in der Richtung —, so dass die endliche Stromleitung von einem continuirlichen Strome durchflossen ist. Dieser Strom wird, wie bei allen dynamoelectrischen Maschinen, durch die Windungen des Electromagnets geführt, um dessen Magnetismus anwachsen zu lassen. Durch eine Stöpselumschaltung ist es möglich, nur einen Theil des Stromes der Inductoren, den von der einen Hälfte erzeugten, durch die Magnetwindungen zu führen, die andere Hälfte aber direct zu verwenden. Man wird das thun, wenn der Leiter, in dem die äussere Arbeit gethan werden soll, einen grossen Widerstand bietet, damit durch diesen nicht auch der für den Magnet bestimmte Strom geschwächt werde; im andern Falle aber kann man den ganzen Strom der hinter- oder nebeneinander verbundenen Inductoren beider Hälften durch die Magnetwindungen gehen lassen. Ich zeige Ihnen die erste Combination an einer Wasserzersetzung, die letzte am Glühen eines starken Platindrahtes.

Die dynamoelectrischen Maschinen sind im Stande, für alle praktischen Zwecke die galvanischen Batterien zu ersetzen, sobald eine ausreichende Arbeitskraft zur Verfügung steht. Während wir von den thermoelectrischen Säulen nur verlangen konnten, dass sie bei ihrer grossen Constanz als Quelle für sehr mässige Stromerregung dienen sollen, liefern schon jetzt die dynamoelectrischen Maschinen Ströme, wie sie nur von unseren mächtigsten Batterien, und von diesen doch immer nur auf kurze Zeit erzeugt werden. Die an wenig zugänglichen Stellen des Gebirges ungenützt vorhandenen Arbeitsvorräthe des Wassers können durch die dynamoelectrische Maschine an jeden anderen Ort verlegt werden. Die an Ort und Stelle getriebene Maschine schickt durch Leitungsdrähte ihren Strom nach dem Orte, wo der Arbeitsvorrath verbraucht werden soll und hier kann er entweder gleich als Strom oder

wieder als Arbeit verwandt werden, indem er eine electromagnetische Maschine in Bewegung setzt.

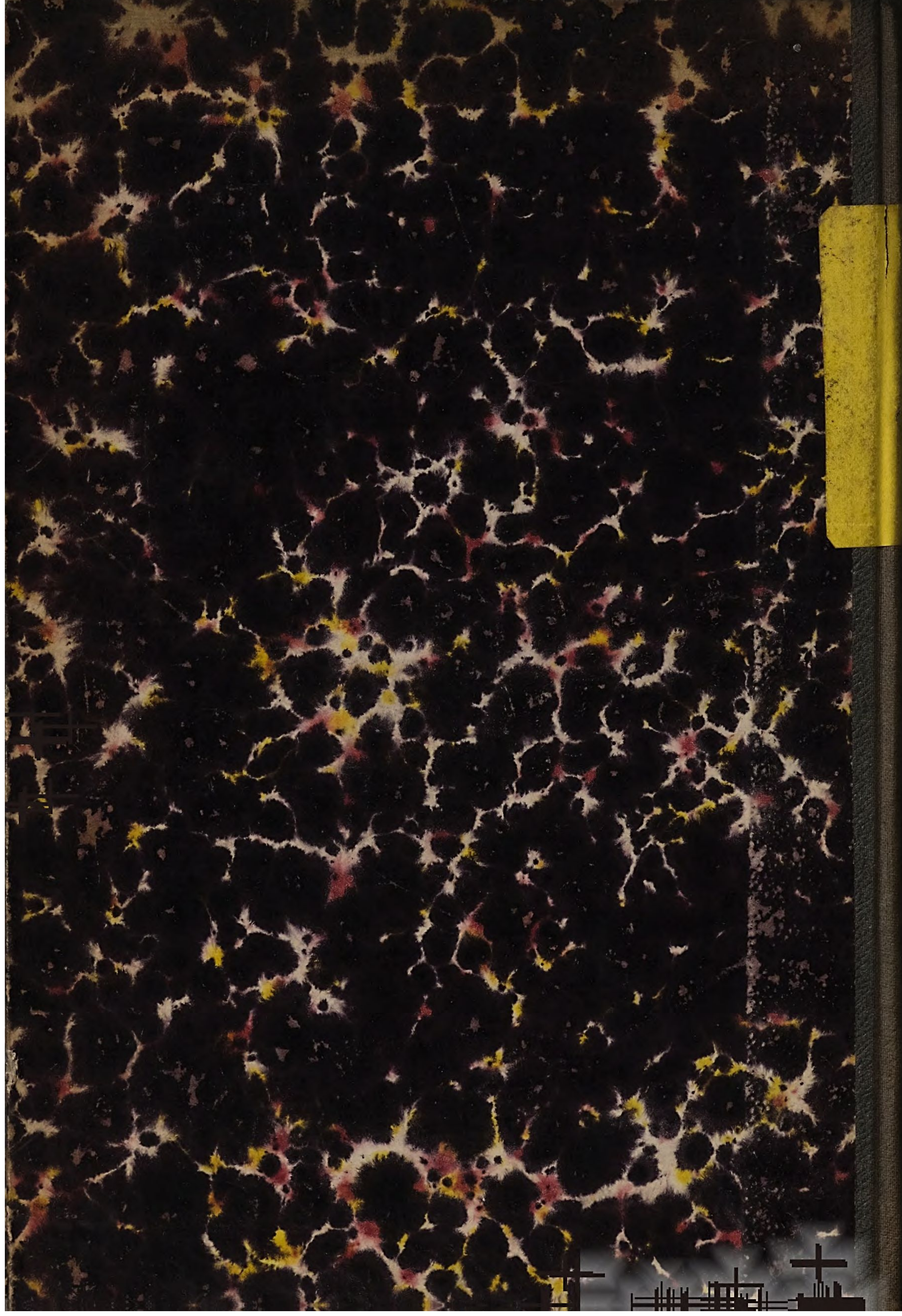
Es bleibt mir noch übrig, von einer Inductionerscheinung zu sprechen, welche zur Begründung der ganzen Lehre von der Induction Veranlassung gegeben hat, von dem durch Arago entdeckten *Rotationsmagnetismus*. Lässt man eine Magnetnadel, nachdem sie einen Anstoss erhalten hat, frei schwingen, so nehmen ihre Schwingungen allmählich an Weite ab und zwar so, dass das Verhältniss je zweier auf einander folgender Schwingungen immer dasselbe bleibt. Erst nach langer Zeit kommt die Nadel durch Reibung und Luftwiderstand zur Ruhe. Befindet sich aber nahe unter oder über der Nadel eine Metallplatte, so nehmen die Schwingungen weit schneller ab, sie werden *gedämpft*. Faraday hat diese Thatsache aus einem Inductionsvorgange erklärt. Sobald ein Magnetpol einem Leiter genähert wird, entsteht in diesem ein Inductionsstrom; wenn dagegen in dem Leiter ein Strom von der Richtung dieses Inductionstromes fliesst, so wird jener Magnetpol dadurch abgestossen. Schwingt nun ein Magnet über eine Kupferplatte so, dass sich sein Nordpol eben nach Westen bewegt, so wird dadurch in den nach Westen hin liegenden Theil der Kupferplatte, dem sich der Pol nähert, ein Strom inducirt, der den Pol nach Osten stösst; ebenso entsteht in dem östlichen Theil der Platte, von dem sich der Pol entfernt, ein Strom, der den Pol nach Osten zieht. So werden die Schwingungen des Magnets gedämpft. Je dicker die Metallmassen sind, in deren Nähe der Magnet sich bewegt, aus je besser leitendem Metall sie bestehen und je grösser die inducirende Kraft des Magnets ist, desto kräftiger ist die Dämpfung. Darum konnte, wie wir an unserem Spiegelgalvanometer gesehen haben, der starke Glockenmagnet in seiner eng anschliessenden dicken Kupferhülse ohne alle Schwingung in seine Ruhelage zurückkehren. Die Abnahme der Schwingungen ist ferner grösser, wenn die Richtkraft des Magnets geschwächt wird; darum wurde die Dämpfung dadurch unterstützt, dass der Magnet durch Annäherung eines Stabmagnetes möglichst vollständig astasirt wurde.

Wird die Magnetnadel über der verticalen Axe einer drehbaren Kupferscheibe aufgehängt, so wird durch eine Drehung der Scheibe von Westen über Norden nach Osten die relative Lage des Magnets zur Scheibe gerade ebenso geändert, wie wenn sich der Nordpol über der ruhenden Scheibe nach Westen bewegte. Der Nordpol wird deshalb wieder nach Osten abgestossen, und zwar jetzt fortgesetzt, so dass er

der Kupferscheibe in ihrer Drehungsrichtung folgt. Ist der Magnet befestigt und die Scheibe drehbar gemacht, so wird sie sich aus ganz den gleichen Gründen mit dem Magnet drehen.

Ich will Ihnen diese Dämpfungserscheinungen noch an einem stärkeren Magnete anschaulich machen. Ein grosser Electromagnet ist so aufgestellt, dass seine beiden Pole einander nahe gegenüberstehen. Zwischen dieselben hänge ich eine Silbermünze an einem Faden auf, den ich drille. Die Münze beginnt, sich um eine verticale Axe zu drehen. Sobald ich den Strom schliesse, der den Electromagnet magnetisirt, steht sie plötzlich gedämpft still; öffne ich den Strom wieder, so geht sie, von einem Inductionsstoss angetrieben, wieder in Bewegung über. Subjectiv lässt sich derselbe Versuch noch auffallender anstellen. Nehmen Sie eine dicke Messingplatte in die Hand, halten Sie dieselbe zwischen die beiden Magnetpole und beginnen Sie nun die Platte hin und her zu bewegen, so haben Sie das Gefühl, als zögen Sie sie durch eine widerstandleistende zähe Substanz hindurch; Tyndall vergleicht dieses Gefühl mit dem, welches das Sägen durch einen Käse veranlassen würde. Durch die Bewegung der Platte werden wieder Ströme in dieselbe inducirt, welche ihre Bewegung dämpfen. In allen diesen Fällen von Dämpfung geht die Bewegung nicht verloren, sondern sie tritt in anderer Gestalt auf, in der von Wärme. Jeder Körper, dessen Bewegung durch solche magnetische Reibung gedämpft wird, erwärmt sich ebenso, wie wenn er durch mechanische Reibung Arbeit verloren hätte.





Beetz, Wilhelm

Grundzüge der Electricitätslehre zehn Vorlesungen, gehalten vor den
Mitgliedern des Ärztlichen Vereins in München ; mit 56 Holzschnitten

Stuttgart 1878

Bamberg, Staatsbibliothek -- Phys.o.87-a
urn:nbn:de:bvb:12-bsb11846162-9